



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DEL CLIMA MARÍTIMO Y DISEÑO DE UNA PROTECCIÓN DEL LITORAL DE SAN ANDRÉS, TENERIFE

Trabajo realizado por:
Manuel Queijeiro Rilo

Dirigido:
Gabriel Díaz Hernández

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Mención:
Hidrología

Santander, junio de 2018

TRABAJO FINAL DE GRADO

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado abordará un análisis del clima marítimo próximo a la localidad de San Andrés.

El pueblo de San Andrés se encuentra dentro del municipio de Santa Cruz de Tenerife, a escasos 8 km al este de esta ciudad, que da nombre a la provincia perteneciente a las islas Canarias.

La problemática que se plantea son los constantes eventos de inundación costera causados por el rebase del oleaje de componentes sur y este, que provocan cuantiosos daños socioeconómicos en la comunidad.

Es por ello que, como primera fase del proyecto, se investigará la secuencia y condiciones bajo las que ocurren los fenómenos con la ayuda de hemerotecas y bases de datos de oleaje. Dichas bases de datos han sido desarrolladas y gentilmente proporcionadas por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria. Estas comprenden la DOW (oleaje), GOT (marea astronómica) y GOS (marea meteorológica). Tras analizar el régimen medio tanto históricamente como por estaciones del año, se procederá a la comparación e identificación de los factores de los eventos de rebase. En base a ello, se distinguirán una o varias familias de oleaje características.

Posteriormente se realizará un análisis detallado de la interacción del oleaje con la costa de San Andrés por medio de un modelo numérico reciente: Celeris. La elección del software se justificará mediante un estudio de las ventajas e inconvenientes que ofrecen las distintas herramientas disponibles en la actualidad y las características requeridas al plantear la estrategia a seguir en la modelización. De este modo se concluye la veracidad del diagnóstico de eventos previo.

A partir de la identificación del temporal de diseño, se propondrán y analizarán diferentes alternativas de protecciones costeras que amortiguarán los efectos de las diversas formas de propagación del oleaje. Posteriormente se realizará un diseño completo de la más adecuada atendiendo no solamente a su efectividad si no también a criterios económicos, técnicos y ambientales.

Mención: Hidrología

Convocatoria: Junio 2018

Palabras Clave: Inundaciones, Rebases, Protección costera, Protección litoral, Obra de abrigo, Dique rebasable, Dique semisumergido, Dique en talud, IHCantabria, DOW, Clima marítimo, Celeris, Propagación de oleaje.

ABSTRACT

The hereby presented Final Degree Project will assume an analysis of the maritime climate of the community of San Andrés.

This village is located in the municipal region of Santa Cruz de Tenerife, around 8 kilometres away from this main city, which name coincides for the province, belonging to the Canary islands.

The issues introduced are the constant on time flooding events on shore, that are caused by the wave action incoming from South and East, and produce significant socioeconomical damages.

Therefore, the first stage of the project will investigate the sequence and conditions under which this phenomena occurs, making use of digital libraries and wave databases. These databases have been developed and kindly provided by the Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria. DOW (waves), GOT (astronomical tide) and GOS (storm surge) are included among them. After analysing the general wave climate and by seasons, a comparison and identification of the multiple factors of the flooding events will be executed. Based on this, wave families will be distinguished.

Afterwards, a detailed analysis of the interaction between waves and the shore of San Andrés will be performed with a new software: Celeris. It will be necessary to investigate the advantages and drawbacks of the different models to set the strategy to follow to choose the most suitable one. With that it will be possible to prove the previous diagnostic.

An identification of the behaviour will enable the beginning of the design, presenting and analysing alternatives of shore protections that will mitigate the effects of the several ways of propagation of the waves. Subsequently, a complete design will be executed for the most appropriate one, attending not only to the effectiveness but also to economical, technical and environmental criteria.

Minor: Hydrology

Call: June 2018

Key Words: Flooding, Overtopping, Protection, Coast, Shore, Seabord, Shoreline, Waterfront, Littoral, Shelter works, Dike, Overtopping dike, IHCantabria, DOW, Maritime climate, Celeris, Wave propagation.

AGRADECIMIENTOS

La lista de personas a las que quiero expresar mi agradecimiento por compartir experiencias a lo largo de estos cuatro años es extensa, pero me gustaría dar las gracias en particular a mi familia y amigos por todo el cariño y apoyo a pesar de la distancia que nos separaban.

Mención especial merece el Director del Trabajo, Gabriel Díaz Hernández, no solamente por la toda la ayuda recibida y sin la cual el presente estudio no hubiese sido posible, si no también por avivar mi interés en esta rama de la ingeniería civil.

Por último, gracias a la Universidad de Cantabria, y concretamente a la Escuela de Caminos y su profesorado, por el trato recibido y el haber podido disfrutar de un programa internacional que me ha hecho madurar personalmente.

A Carmen

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Descripción general de la comunidad de San Andrés	9
1.2. Descripción del problema: antecedentes y situación actual.	11
1.3. Objetivo del estudio.	12
1.4. Motivación.	13
2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y CLIMA MARÍTIMO.....	14
2.1. Exposición de eventos pasados.....	14
2.2. Investigación de la causa.....	22
2.2.1. La Marea Astronómica.	22
2.2.2. El mar de fondo.	26
2.2.3. La topografía de San Andrés.	28
2.3. Clima marítimo de San Andrés.....	29
2.3.1. Bases de datos empleadas.	29
2.3.2. Clima marítimo general.....	32
2.3.3. Clima marítimo por estaciones del año.....	35
2.3.4. Clima marítimo de los eventos de inundación.....	42
2.4. Diagnóstico de características de los eventos pasados.	51
3. ANÁLISIS DE INTERACCIÓN DEL OLEAJE CON LA COSTA.....	54
3.1. Introducción.	54
3.2. Metodología propuesta.....	55
3.2.1. Modelaje numérico.	55
3.2.2. Modelos numéricos disponibles.	55
3.2.3. Modelo numérico seleccionado: CELERIS.	57
3.2.4. Estrategia numérica planteada.	59
3.3. Funcionamiento de la costa de San Andrés ante eventos de inundación.	63
3.4. Conclusión.....	67
4. DISEÑO DE UNA PROTECCIÓN COSTERA.....	68
4.1. Planteamiento.....	68
4.1.1. Alternativa 1.....	68
4.1.2. Alternativa 2.....	70

4.1.3.	Alternativa 3.....	71
4.2.	Justificación de la alternativa elegida.	74
4.2.1.	Establecimiento de los criterios.	74
4.2.2.	Peso de los criterios.	74
4.2.3.	Valoración de las alternativas.	75
4.2.4.	Agregación de las evaluaciones parciales.	78
4.3.	Mejoras a la alternativa seleccionada.....	79
4.4.	Cálculos.	80
4.4.1.	Operatividad y período de retorno.	80
4.4.2.	Oleaje a pie de dique.....	85
4.4.3.	Dimensionamiento de las piezas.....	90
Apéndice I: Planos.....		100
Apéndice II: Transmisividad del dique		101
Apéndice III: Listado de figuras y tablas.		102
Apéndice IV: Referencias.....		104
Apéndice V: Scripts de Matlab. (*.m)		107
Apéndice VI: Scripts de Celeris. (*.cml).....		118
Apéndice VII: Gráficas de Celeris.		120

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción general de la comunidad de San Andrés

San Andrés es una de las entidades de población más significativas que se encuentran dentro del municipio de Santa Cruz de Tenerife, incluida administrativamente en el distrito de Anaga. San Andrés se localiza a escasos 8 km al nordeste de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife, que también da nombre a la provincia perteneciente a las islas Canarias, España.



Fig. 1: Localización de la comunidad de San Andrés. Imágenes recuperadas de GoogleMaps.

Sus orígenes se remontan a la toma de la isla en el siglo XV, y recibe hoy en día la consideración oficial de “pueblo”. San Andrés se sitúa en un valle de la vertiente sur del macizo de Anaga. Ocupa una superficie de 21.14 km², mayoritariamente espacio natural protegido (declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO), inclusive parte de su frente costero.

Su demografía, en torno a 2600 habitantes, se dedica principalmente al sector servicios en la actualidad, entregada a un turismo que se ve atraído por sus agradables temperaturas, playas y festividades, por lo que la seguridad e integridad de su costa es clave la economía. A esto lo acompaña su carácter tradicional de agrícola-ganadero y especialmente, su comunidad pesquera. La escasez de terreno fácilmente cultivable, dada su limitada superficie y los accidentes geográficos existentes (barrancos pronunciados y acantilados), condujeron a esta terciarización de la economía a partir de la década de 1960. Hecho favorecido por el desarrollo de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife hacia el noreste, con por ejemplo, la creación de la Autovía de San Andrés en 1975, la avenida de la ciudad (ampliada por Sacyr en 2013) separada del mar por una simple escollera, o la expansión de la playa de Las Teresitas.

La playa fue artificialmente transformada en 1973, al ampliar el pequeño cordón basáltico original con arenas calcáreas provenientes del desierto del Sáhara. Actualmente cuenta con 1.3 km de largo y una anchura media de 80 metros . Asimismo, Las Teresitas se encuentra protegida por un rompeolas rebasable a aproximadamente 150 metros de la orilla, paralelo y semisumergido. Presenta dos bocanas en sus extremos, limitados por dos espigones que parten del cabo Punta de Los Órganos y de la Cofradía de Pescadores, que se pueden apreciar en la imagen a continuación y evitan la pérdida de arena de la playa.

Esta artificialización imprudente del frente costero ha provocado que la franja de 0.07 km² en la que se concentra la población entre la dársena pesquera y la playa de Las Teresitas, se sitúe actualmente bajo el nivel del mar, con los riesgos asociados a ello. En añadidura, cabe mencionar la disposición de las calles, perpendiculares a la avenida, que favorecen la intrusión del oleaje en las ocasiones en que esta es rebasada.



Fig. 2: Vista aérea del pueblo de San Andrés.

1.2. Descripción del problema: antecedentes y situación actual.

La comunidad de San Andrés sufre periódicos eventos de inundación que afectan en mayor o menor medida a los habitantes del pueblo. Hasta el momento, no se ha documentado ninguna víctima mortal o herido debido a las inundaciones por oleaje, sin embargo, son cuantiosos los daños económicos que provoca tanto en la infraestructura pública como privada. Esto es especialmente importante en el paseo marítimo o viviendas y comercios de primera línea de costa. Estas quedan anegadas con más de un metro de agua a pesar de los esfuerzos de los vecinos, que intentan frenar la entrada colocando maderas y sacos de arena en puertas y ventanas. Ello ha llevado a los habitantes de San Andrés a manifestar su necesidad de algún tipo de protección costera en numerosas ocasiones.



Fig. 3: Oleaje rebasando la avenida de San Andrés.

El presente TFG recoge información acerca de estos eventos de inundación, que serán expuestos en la sección 2.1. con el objetivo de ilustrar la problemática y hallar su origen.

Dentro de esa recopilación, se observa como el período final de agosto de 2011 fue crítico en la historia del clima marítimo de San Andrés. Tras ello se procedió a levantar un muro de contención que fue derribado por el mar al año siguiente.

Asimismo, se propusieron en la segunda mitad del año 2012 diversas alternativas que incluían la opción de crear una nueva playa artificial con el objetivo de mitigar el oleaje, opciones por supuesto muy atractivas para una comunidad influenciada por el turismo.

Sin embargo, no fue hasta julio de 2014 cuando se decidieron por una opción definitiva. La Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife sacaba a licitación pública un proyecto destinado a la protección costera de San Andrés. Sacyr, empresa constructora española multinacional, ganaba el concurso y comenzaba a erigir un dique semisumergido de 350 metros frente al pueblo. El proyecto se daría por finalizado en mayo de 2016.

1.3. Objetivo del estudio.

El presente documento se abordará de modo detallado una investigación de los eventos de inundación ocurridos a lo largo de la historia reciente de San Andrés, aquellos de los cuales se puede encontrar una información más exacta y veraz. Para contrastarla y apoyarla, se analizará junto con las bases de datos proporcionadas por el Instituto Hidráulico de Cantabria, que recogen información del clima marítimo de la zona desde el año 1948 hasta el 2015: mareas astronómicas, meteorológicas y series de oleaje.

Este hecho es pues un factor limitante a la hora de evaluar la efectividad del nuevo dique semisumergido, que como se ha explicado anteriormente, fue construido en dicho año. Por consiguiente, para el objetivo principal de este estudio se obviará la susodicha obra, independientemente de que cumpla o no su cometido. Es decir, la finalidad subyacente de este TFG, perteneciente a la mención de Hidráulica e Hidrología del grado de ingeniería Civil, consistirá en el diseño último de una construcción de protección costera para el pueblo de San Andrés.

Siguiendo a un trabajo de hemeroteca de búsqueda de los eventos de inundación y corroboración con la base de datos de oleaje, se procederá al análisis específico de cada uno junto con el clima marítimo en general. A continuación se hallará la causa que conduce a dichas situaciones. Se expondrán objetivamente los resultados de la caracterización de los eventos y tras ello, comenzará el uso del modelo numérico CELERIS, con el que se determinarán los mecanismos de propagación del oleaje en la costa.

En base a ello, se diseñarán diversas alternativas hasta encontrar una satisfactoria no solo atendiendo a la mitigación del oleaje si no también considerando factores económicos y ecológicos.

Se dispondrá así de una justificación e información necesarias para el correcto desarrollo del proyecto de construcción, que será completado en el trabajo de fin de grado correspondiente a la mención de Construcciones Civiles.

1.4. Motivación.

Toda obra civil ha de tener el objetivo de suplir una necesidad del ciudadano o cuando menos mejorar su calidad de vida. Esto es, no se trata de la construcción porque sí. La ingeniería civil persigue un objetivo puntual: generar un beneficio concreto para la organización de un territorio y mejorar la calidad de vida de una comunidad, región o país.

Este proyecto según se mostrará cumple el requisito con creces, pues los vecinos de San Andrés ven destrozado su pueblo, sus casas y sus pertenencias cíclicamente. Afortunadamente, hasta el momento no hay que lamentar ningún daño personal pero sin embargo, es imperativo hallar una solución al problema antes de que esto se produzca. Son los propios habitantes quienes demandan un remedio que erradique de una vez por todas un problema.

En complemento, al ser San Andrés una comunidad perteneciente a las islas Canarias, territorio de clima envidiable y turístico por naturaleza, la seguridad de zona costera es vital para el desarrollo de su economía. Dada la ocupación del litoral del archipiélago, con franjas de modesta superficie lindando con terreno montañoso, en el que ha implantado un modelo económico turístico-inmobiliario, se recibe actualmente una mayor frecuencia e incidencia espaciotemporal de riesgos. Esto es especialmente remarcable en el último medio siglo, tras el aumento de la migración de la población a la costa y las visitas turísticas que recibe (casi 15 millones en 2016), aumentando así la exposición ante los posibles peligros.

Otro factor a tener en cuenta es la incidencia del cambio climático en los eventos de inundación. Es un hecho que el calentamiento global ha producido un aumento del NMM escandaloso, 14 cm en el último siglo y actualmente a un ritmo de 3.4 mm anuales, incrementando así las probabilidades de inundación. Estudios revelan con un intervalo de confianza del 90% como el aumento del nivel del mar atribuido a causas antropogénicas es responsable de hasta 2/3 de las inundaciones que se producen normalmente (Strauss et al., 2016). Si bien el documento se focaliza en USA, su extrapolación a otros puntos del planeta es innegable.

Por otra parte, en España los temporales marinos ocupan el primer puesto en cuanto al número de víctimas mortales causadas por catástrofes naturales, con 511 fallecidos entre los años 1990 y 2000 (Ayala et al., 2004)

Un último hecho que sirve como fundamento para apoyar este TFG son las inversiones multimillonarias que se destinan a labores de mantenimiento, restauración, ordenación de usos, obras de emergencia, etc., en el litoral español. En el período de 1986-2016 se han estimado pérdidas por erosión costera superiores a 4000 millones de euros (González de Vallejo et al., 1988).

Expuestas las principales razones, es irrefutable la creación de nuevas herramientas de gestión, reducción y mitigación de los riesgos asociados al mar, y, de algún modo, el presente TFG se encuentra encaminado a este fin.

Por último, espero que este documento sirva de ejemplo de partida para situaciones similares de inundación o de cara a una investigación más detallada de la misma. En la actualidad, San Andrés posee una protección costera cuya eficacia no ha podido ser comprobada por falta de datos al ser relativamente reciente. Sin embargo, el presente documento puede tener utilidad como alternativa o simplemente para contrastar posibles soluciones.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y CLIMA MARÍTIMO.

2.1. Exposición de eventos pasados.

Como ya se ha mencionado, la comunidad de San Andrés sufre los efectos del oleaje desde tiempos inmemorables. Para ilustrar estos efectos, así como con la intención de hallar una correlación entre ellos, el presente TFG recoge algunas de las muchas noticias que se pueden encontrar a lo largo de los últimos años. La era de información en la que vivimos ha hecho posible esta exposición de los hechos en base a hemerotecas de periódicos digitales, telediarios y otros testimonios fundamentados.

Es esta pues una sección que consiste en un trabajo de investigación. A continuación se presentan algunas de las consecuencias más relevantes. Cabe destacar la fiabilidad de las fuentes de información utilizadas. De acuerdo a esta integridad se han descartado ciertos eventos de cuales no se han encontrado noticias irrefutablemente fidedignas. Valga de ejemplo el temporal existente el 27 de agosto de 1996, cuya escala de tiempo se aleja demasiado como para hallar fuentes de información de calidad.

La prensa consultada corresponde a La Opinión de Tenerife, El Día, Canarias 7, Canarias Ahora y Diario de Avisos. Además se han empleado otros entornos web como son el correspondiente a Antena 3 Noticias o “MeteoLaMatanza”, que recoge las efemérides meteorológicas más importantes que han asolado el archipiélago en el último siglo. También es posible corroborar esta hemeroteca mediante vídeos que suben los propios habitantes de San Andrés a la red en señal de protesta.

“Los días 6 y 7 de Enero de 1999, un frente temporal del este trajo a Santa Cruz y al resto del archipiélago unas olas enormes que destruyeron muchas infraestructuras portuarias. Sólo En Santa Cruz, quedó destruido el paseo de San Andrés, gran parte del Muelle Sur, el muelle de la Facultad de Ciencias del Mar, el de la Escuela de Vela y el Parque Marítimo. También afectó seriamente a la avenida de San Andrés”

MeteoLaMatanza©

El oleaje vuelve a destrozar el frente marítimo de San Andrés. 04/07/2007

“El fuerte oleaje provocó una vez más destrozos en la avenida marítima y varios comercios de la zona se vieron con casi medio metro de agua dentro.”

“Tras 30 años de demandas y ocho años de promesas, se sigue sin construir la escollera que defendería al pueblo de los embates del mar.”



Canarias7©

Consecuencias del oleaje en San Andrés. 23/12/2010

“La avenida marítima ha sido cerrada al tráfico por levantarse en parte y hacer el mar un gran socavón en la acera. Los vecinos aseguran que hace falta una escollera.”



Antena3Canarias©

El máximo exponente del poder del oleaje ocurrió a finales de agosto de 2011. El agua inundó más de una veintena de viviendas y destrozando vehículos, árboles y pavimento en el poblado de San Andrés manteniendo al pueblo y a los servicios de emergencia en alerta durante los días 29,30 y 31.

Continúa el fuerte oleaje en Santa Cruz de Tenerife. 30/08/2011

“El Barrio de San Andrés es de los más afectados por el fuerte oleaje que azota la costa de tenerife. Olas de más de dos metros han inundado el paseo marítimo (...) varias casas se han inundado y las calles han desaparecido bajo el agua. A pesar de los daños en el mobiliario urbano, no ha habido ninguno personal.”



Antena3Canarias©

Las olas golpean de nuevo a San Andrés. 30/08/2011

“Al menos cinco casas acabaron inundadas, con un metro de altura de agua, y unos 15 vehículos quedaron inservibles (...) las olas entraron hasta las palmeras de la playa.”

“Todos los vecinos, sin excepción, coinciden al afirmar que la culpa de que el mar entre hasta más de cien metros dentro del pueblo, es la falta de una escollera que proteja el frente de su barrio. Por ella luchan desde hace más de 60 años.”

LaOpinióndeTenerife©



Tras las graves inundaciones de 2011, el ayuntamiento levantó una estructura a modo de muro preventivo. Sin embargo, al año siguiente se comprobó su rendimiento y se propuso una solución definitiva, como explican las siguientes noticias.

San Andrés volvió a sufrir ayer los embates del fuerte oleaje y cerró su avenida.
06/02/2012

Desde media mañana y hasta las 15:00 horas, justo en el tramo de pleamar, el cuerpo municipal decidió impedir el paso de coches ante los riesgos que suponía el mar, si bien el tramo de la avenida no registró incidentes dignos de reseñar, lo que prueba, de momento, el acierto de la altura y refuerzo del dique tras el temporal de finales de agosto del año pasado.



ElDía ©

El oleaje 'tumba' el nuevo muro de San Andrés. 18/06/2012

“El muro construido para evitar las inundaciones que de forma cíclica sufre la avenida de San Andrés en Santa Cruz no ha soportado las primeras embestidas del mar. Los vecinos de este barrio costero fueron testigos como de nuevo la calzada se llenaba de piedras llegadas hasta este punto por la fuerza de las olas”

“El Ayuntamiento pretendía que tuviera más altura para que resultara más eficaz, finalmente los vecinos exigieron que tuviera unas dimensiones más reducidas con el fin de que no se les impidiera ver el mar.”

“La Autoridad Portuaria de Santa Cruz ya ha finalizado el proyecto básico para la construcción de un rompeolas en San Andrés que ponga fin a las inundaciones. En estos momentos se plantean tres alternativas posibles, de las que dos de ellas incorporan una playa de callaos. La obra que incluye solo el dique semisumergido supone una inversión de 2,5 millones y los trabajos que además dotan al barrio de otra playa ascienden hasta los 4,2 millones de euros.”



CanariasAhora©

En noviembre, un estudio del Ministerio de Fomento, analizaba hasta 9 posibles soluciones a los constantes eventos de inundación. Finalmente, se elegía una opción que consistía en la construcción de un dique discontinuo junto a una playa doble a lo largo de la avenida. Se preveía una reducción de la agitación del oleaje así como una alternativa atractiva para el turismo, al añadir una playa urbana en la zona. Esta alternativa no parecía ser la adecuada y los fenómenos siguieron devastando el paseo marítimo y las viviendas más cercanas al mismo.

El oleaje golpea de nuevo San Andrés. 02/06/2014



“Aspecto que ofrecía ayer la vía de salida de la avenida principal de San Andrés, donde se encuentra la primera línea de viviendas frente al mar.”

El Día ©

El oleaje causa estragos en Canarias. 27/08/2014

“En la isla de Tenerife la zona más afectada, como ya viene siendo habitual cuando se suceden estos episodios, ha sido el litoral de Santa Cruz, y más concretamente el barrio de San Andrés. Allí las fuertes olas han alcanzado el paseo marítimo causando destrozos y provocando cortes intermitentes de los carriles de entrada y salida a la zona.”

CanariasAhora©



LaOpiniónDeTenerife©

En julio de 2014 la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife sacaba a licitación pública un proyecto destinado a la protección costera de San Andrés. El 80% del presupuesto fue asimilado por el Ministerio de Fomento Español y el resto por el Fondo de Compensación Interportuario. Esta solución, escogida entre más de catorce, era supuestamente la más adecuada según criterios económicos, técnicos y ambientales. Se trata de un dique horizontal de 350 metros con una disposición en planta sensiblemente paralela a la costa, entre las batimétricas -5 y -6 y un contradique de 60 metros, que arranca desde la altura de la glorieta de entrada al pueblo, que se construirán con bloques de hormigón de siete toneladas.

El proyecto fue adjudicado a Sacyr con un presupuesto de 3.15 millones de euros, empresa que también había remodelado el paseo marítimo. Su construcción comenzó en Septiembre tras ser paralizada por una denuncia ecologista de la Federación Canaria de Surf.

La obra, que tenía un plazo de ejecución de 10 meses, comenzó oficialmente el 17 de octubre de 2014 y concluyó a finales de 2015 con un coste de 4.2 millones de euros. El retraso fue parcialmente debido a diversas denuncias de campañas protectoras del medio ambiente que incluso fueron llevadas al tribunal supremo, así como eventos de marejada. Fue especialmente relevante el que se llevó 60 metros de dique en octubre de 2015.

El fuerte oleaje se lleva 60 metros del dique semisumergido de San Andrés.

20/10/2015

"El concejal de Servicios Públicos (...) informa de que ya se está reponiendo lo que ha perdido la escollera. Pero a pesar de lo sucedido, añade el edil, se puede comprobar el buen funcionamiento de la obra, pues con el mar malo el agua ya no llega a la Avenida Marítima"



LaOpini3nDeTenerife©

Tras esta reciente construcci3n no se han dado, o al menos no se han encontrado referencias, inundaciones del pueblo como era habitual. Por ende, en un principio podemos catalogar como exitosa la obra, sin embargo, ser3 el paso del tiempo el que lo decida.

2.2. Investigación de la causa.

Concluida una primera sección de búsqueda de información sobre los acontecimientos el siguiente paso en la metodología consiste en hallar la causa subyacente a todos ellos. Con ello se podrá realizar un primer análisis de la situación, que será concluido en la sección 3.3, tras haber ejecutado las simulaciones.

2.2.1. La Marea Astronómica.

Un primer aspecto a tener en cuenta es la fecha en la que se producen. En su mayoría, estos eventos se producen una vez termina el verano, en la época de finales de agosto, septiembre... octubre a lo sumo; cada x período de tiempo. De este modo, es posible relacionar los hechos con una causa completamente determinista como lo es la marea astronómica. A continuación se presentan ciertos aspectos básicos sobre la misma para una mejor comprensión de la naturaleza de este fenómeno.

Como es bien sabido, el nivel del mar es influido notablemente por la variación de la fuerza gravedad de los cuerpos celestes en su perpetuo movimiento por el espacio. La gravedad atrae y repele el agua de los océanos en un efecto que recibe el nombre de marea astronómica y esta formado por diversos constituyentes. En el caso de la Tierra, son la Luna y el Sol son los cuerpos que la provocan mayoritariamente.

Dicha fuerza depende de diversos factores, que se rigen por la Ley de Gravitación Universal de Isaac Newton. La misma pone de manifiesto la influencia de la distancia y de la masa de los cuerpos.

Por un lado tenemos las consecuencias de la masa. La fuerza de gravedad varía de forma proporcional al producto de la masa de ambos cuerpos.

Segundo, la distancia. La gravedad decrece con un valor inversamente proporcional a la distancia al cuadrado entre los centros de masa. Teniendo en cuenta sólo estos dos parámetros puede llegarse a la conclusión de que el efecto que produce la Luna es de aproximadamente el doble que el Sol. Pero en añadidura, el cálculo se complica al incluir las siguientes características, igualmente importantes para nuestro proyecto.

1. El eje de la Tierra está inclinado $23^{\circ}27'$ respecto de la perpendicular al plano de la eclíptica y esto hace que el ángulo formado por el plano ecuatorial y el plano de la eclíptica varíe en $\pm 23^{\circ}27'$ a lo largo del año.
2. La órbita de la Tierra alrededor del Sol es elíptica, como enuncia la primera ley de Kepler, por lo que la distancia entre la Tierra y el Sol no es constante.
3. La órbita de la Luna alrededor de la Tierra es elíptica, por lo que la distancia entre la Tierra y la Luna no es constante.

La primera sentencia es la que principalmente decide el tipo de marea en un determinado lugar, es decir, la declinación provoca resultados diferentes dependiendo de la latitud y longitud de la coordinada analizada. Básicamente podemos distinguir entre

- a) Semidiurnas: - Es el tipo de marea de San Andrés de Tenerife, hay dos pleamares y dos bajamares en el transcurso de un día lunar. Considerando que el día lunar tiene una duración de 24h 50m, teóricamente cada 6h 13m se produce una pleamar o una bajamar.
- b) Diurnas: Características en las latitudes bajas, con una pleamar y una bajamar en el transcurso del día lunar. Por tanto se produce una pleamar y una bajamar cada 12h 25m.
- c) Diurnas irregulares: Con dos ciclos por día lunar pero con marcadas diferencias en las alturas y en los períodos de tiempo.
- d) Mareas mixtas: Régimen de tipo intermedio, durante un día lunar se presentan dos pleamares y una bajamar o dos bajamares y una pleamar.

Si combinamos la declinación con la segunda característica comentada previamente explicaremos los fenómenos de solsticios y equinoccios. El eje inclinado permanece constante en todo el recorrido de la órbita, por lo tanto zonas geográficas ubicada en el hemisferio norte estarán más cerca del Sol en el afelio (momento en que la tierra está más lejos del Sol) donde será verano y regiones del hemisferio sur estarán más alejadas y será invierno; esto comienza el 22 de junio y se llama solsticio. Hay otro solsticio, diametralmente opuesto al anterior (22 de diciembre) donde se presenta el hemisferio norte más alejado y más cercano al Sol el hemisferio sur, el cual es el solsticio de perihelio. En los equinoccios (21 de marzo primavera en hemisferio Norte) y 23 de septiembre (otoño para el hemisferio norte) los rayos del Sol caen exactamente sobre el ecuador y en estas dos posiciones de la órbita terrestre es cuando la Tierra se encuentra más cerca del Sol.

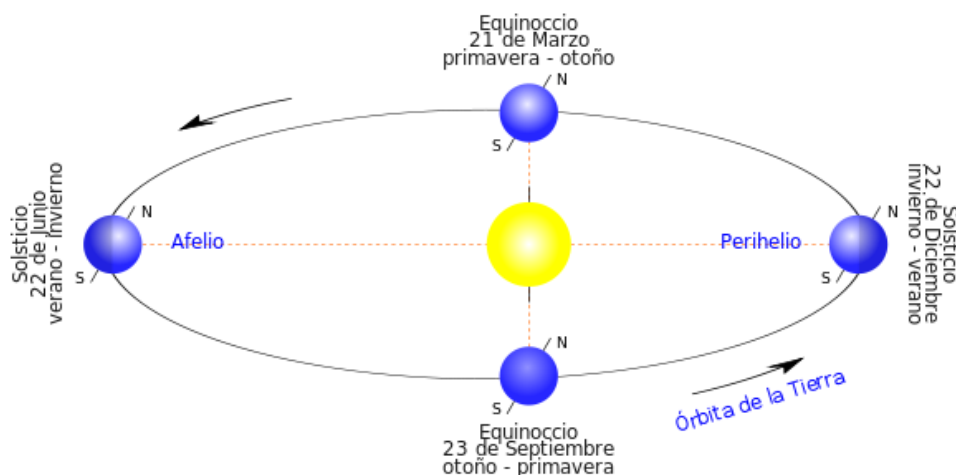


Fig. 4: Fases de la traslación terrestre con sus correspondientes estaciones.

A su vez, la Luna también describe una órbita elíptica y las diferencias en su distancia provocan los efectos señalados anteriormente. En este caso, la posición más cercana a la Tierra recibe el nombre de perigeo y la más alejada apogeo.

Un último hecho fundamental que entra en consideración es la posible alineación de los tres astros. En este momento se suman las fuerzas de atracción de la luna y el sol y obviamente las mareas son las mas extremas, recibiendo el nombre de mareas vivas o de sicigia. Esto es, las bajamares son más bajas de lo normal y las pleamares alcanzan sus máximos niveles. El caso de que la Tierra se encuentre entre la Luna y el Sol recibe el nombre de oposición y es el correspondiente a la luna llena, mientras que cuando es la Luna la que se encuentra entre ambos se denomina conjunción, y se corresponde con la luna nueva. La diferencia entre ambas, a efectos de nivel del mar, es mínima. Sin embargo, cabe decir que cuando la Luna y el Sol forman un ángulo perpendicular con la Tierra estaríamos hablando de cuarto creciente y decreciente, siendo un período de mareas muertas o de cuadratura. La consecuencia lógica de estas circunstancias es que las mareas máximas serán aquellas que combinen sicigias equinocciales de perigeo.

Como punto final de esta pequeña recolección de factores, también existe la afección que provocan los propios continentes, limitando el movimiento. Así, pequeñas masas de agua encerradas en cuencas, o mares tales como el Mediterráneo, el Caribe o el de Japón apenas tendrán variación en su nivel. Y del mismo modo, se aprecia un cambio de nivel mucho mayor en la costa que en el medio del océano, existiendo puntos anfidrómicos y otras singularidades mucho menos relevantes para el TFG en cuestión.

Con el objetivo de analizar estas características se han empleado a lo largo de la historia teorías como la del equilibrio de Newton (1686) o la dinámica de Euler, Laplace, y Bernoulli. Actualmente se realiza un proceso de análisis armónico.

El análisis armónico se basa en el conocimiento de que la marea esta formada por un número de contribuciones armónicas con función sinoidal que se superponen:

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i)$$

donde:

a_0 es el nivel medio

a_i es la amplitud de onda del componente i

ω_i es la frecuencia de la onda componente i

α_i es el desfase de la onda componente

t es el instante en que se calcula la marea

N es el número de componentes consideradas

En base a esto y con diferentes métodos (mínimos cuadrados es el más usual) se tienen en cuenta los efectos anteriormente considerados, con constituyentes armónicos que tienen sus períodos completamente definidos.

A continuación se muestra una tabla con los principales contribuyentes, para un mayor detalle se sugiere visitar el sitio web de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA):

Símbolo	Periodo (horas)	Descripción
M2	12.42	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido a la Luna
S2	12.00	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido al Sol
N2	12.66	Debido a la variación de la distancia entre la Tierra y la Luna
K2	11.97	Debido a los cambios de declinación del Sol y la Luna
K1	23.93	Solar-lunar
O1	25.82	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna
P1	24.07	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna

Tabla 1: Armónicos principales de la marea astronómica

Respecto al caso concreto de los eventos más relevantes ocurridos en San Andrés, el proceso de análisis relaciona las fechas con los siguientes estados particulares de los astros considerados, representados tabuladamente a continuación. Para hallar dichos estados se ha empleado un calendario lunar de Santa Cruz de Tenerife. Previamente, se han contrastado las noticias expuestas con la serie DOW mediante la herramienta Matlab, con ello se han obtenido las fechas concretas del evento que se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Fecha	Fase Lunar (% iluminación)	Posición relativa al Sol	Perigeo próximo
03/01/1999	Llena 99.07%	Solsticio invierno	30/12/1998
03/07/2007	Llena 93.48%	Solsticio verano- Equinoccio otoño	09/07/2007
23/12/2010	Llena 96.80%	Solsticio invierno	25/12/2010
28/08/2011	Nueva 1.99%	Solsticio verano - Equinoccio otoño	02/08/2011
06/02/2012	Llena 95.67%	Solsticio invierno - Equinoccio primavera	11/02/2012
18/06/2012	Nueva 2.38%	Solsticio verano	01/07/2012
02/06/2014	Nueva 5.14%	Solsticio verano	15/06/2014
26/08/2014	Nueva 0.10%	Solsticio verano - Equinoccio otoño	10/08/2014

Tabla 2: Principales datos asociados a la posición Sol-Tierra-Luna en las inundaciones.

A partir de los datos obtenidos se puede concluir tal y como se anticipaba, que la alineación del Sol, la Tierra y la Luna es determinante en los eventos de inundación. Por otra parte, se ve una cierta influencia del perigeo en la mayoría de ellos. Asimismo, estos suelen ocurrir a finales de verano, coincidiendo con el equinoccio de otoño, punto en el que el Sol se encuentra más próximo a la Tierra.

De hecho, como curiosidad, los habitantes de San Andrés conocen este fenómeno como mareas del Pino, por darse próximo a la festividad de la Virgen del Pino, patrona de Gran Canaria, que se celebra el 8 de septiembre.

2.2.2. El mar de fondo.

Con el término oleaje se refiere habitualmente al generado por el viento. Las oscilaciones de presión generadas por la turbulencia del viento sobre la superficie generan ondas capilares sobre las que actúa el arrastre del viento, haciéndolas crecer en altura y periodo hasta que la fuerza restauradora básica es la gravedad. Si la acción del viento continúa, continúa el crecimiento en altura y periodo hasta que las ondas de más bajo periodo comienzan a viajar más rápidas que el viento, perdiendo energía. Como también se pierde energía por rotura de las ondas más peraltadas, el proceso de crecimiento (para una velocidad del viento dada) se detiene, diciéndose que el oleaje está totalmente desarrollado. Mientras el oleaje está en proceso de crecimiento, se dice que está parcialmente desarrollado y la limitación al desarrollo puede ser por falta de tiempo de generación (limitación por tiempo) o por falta de espacio de generación (limitación por fetch). Tanto los oleajes totalmente desarrollados como los parcialmente desarrollados dependen de la velocidad del viento y por ello se denominan oleaje o mar de viento (en inglés “sea”).

Cuando el oleaje sale de la zona de generación, los trenes de ondas componentes comienzan a viajar a costa de su propia energía. Como en profundidades oceánicas las componentes de mayor periodo viajan más deprisa (dispersión radial), se destacan del resto y llegan antes a puntos alejados de la zona de generación, donde se percibe la llegada del temporal con el brusco aumento del periodo. Además como los trenes de ondas en la zona de generación tienen diferentes direcciones (dispersión direccional), en un punto alejado también se percibe un oleaje mucho más direccionado. A este oleaje fuera de la zona de generación, más regular y unidireccional, se le denomina mar de fondo o mar tendida (“swell” en inglés). A un punto del océano pueden llegar oleajes swell procedentes de diferentes zonas de generación alejadas y haber también un viento local, con dirección diferente a las de los swell, generando un oleaje de viento.

Son 5 los factores que influyen principalmente la formación del swell:

- Velocidad del viento o su fuerza relativa a la velocidad de la ola. Pues el viento debe moverse más rápido que la cresta para transferirle energía.
- La distancia ininterrumpida de mar abierto sobre la que el viento sopla sin un cambio significativo de dirección, el fetch.
- Anchura del área afectada por el fetch.
- Duración del viento sobre el fetch: Vientos prolongados crean olas más grandes.
- Profundidad del agua.

En el caso que nos ocupa el oleaje se puede generar tanto en la zona este de la isla, donde las corrientes siguen dicha dirección, existiendo una cierta limitación del fetch por distancia; o bien proceder del sur, desarrollándose y viajando a lo largo de miles de kilómetros por el Atlántico. Un análisis más detallado de la situación será ejecutado posteriormente.



Fig. 5: Ejemplo de oleaje y corrientes marinas. Captura recuperada de earth.nullschool.net.

Se plantea la probabilidad de que un oleaje definido, tipo swell contribuya al proceso de inundación. La combinación de mar de fondo y mareas vivas es lo que los habitantes de Canarias conocen popularmente con el término “reboso”.

2.2.3. La topografía de San Andrés.

Una característica determinante de San Andrés es su localización geográfica. Su evidente exposición al oleaje del este y especialmente del sur, desde donde se puede desarrollar a lo largo de grandes distancias.

En cuanto a la batimetría, no existen accidentes naturales relevantes en la plataforma continental, descendiendo progresivamente. Un detalle de la batimetría se puede observar a continuación:

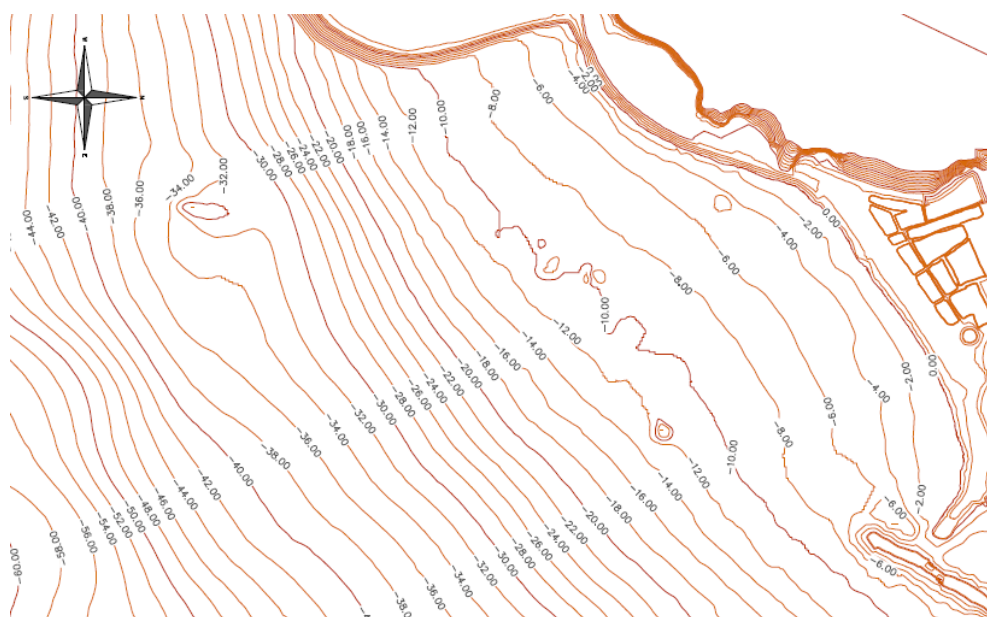


Fig. 6: Batimetría de la zona en cuestión.

Asimismo, cabe destacar que el núcleo urbano de San Andrés se encuentra por debajo del nivel del mar, lo que sin duda es un factor que favorece las inundaciones. Es decir, la avenida de la ciudad (ampliada por Sacyr en 2013), separada del mar por una simple escollera, es el único elemento que la limita esa depresión en el terreno. Esto implica además las dificultades para desalojar el agua que anega el pueblo.

Por último, en cuanto a protecciones en el litoral, cabe destacar por una parte, el dique semisumergido de escollera, que protege la playa de las Teresitas así como parcialmente el pueblo cuando el oleaje es más oblicuo a este. Por otro lado, la combinación de la protección curva en la dársena pesquera y el pequeño rompeolas mar adentro en la Cofradía de Pescadores. La incidencia del oleaje en estos dos elementos, además de disipación de energía, provoca otros fenómenos como son la refracción, reflexión y su propagación longitudinal a la costa. Estas ondas recorren el litoral de San Andrés en sentidos opuestos hasta que se encuentran cerca del núcleo urbano, donde se acoplan pudiendo generar sobreelevaciones que desencadenan los rebases. Además, se dispone de escollera de escollera en talud, a juzgar por las imágenes, no mayor a 500 t, protegiendo el paseo marítimo mediante la disipación del oleaje.

2.3. Clima marítimo de San Andrés.

2.3.1. Bases de datos empleadas.

En este capítulo se describen las bases de datos que han sido usadas para el cálculo del clima marítimo en aguas profundas, que a continuación será propagado al área de interés. Esto permitirá razonar si los resultados han sido lógicos. Es fundamental una buena comprensión de las mismas pues son la base de todo el trabajo desenvuelto a posteriori.

Dichas bases de datos han sido desarrolladas por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria) en torno al año 2011. Estas son principalmente las series de oleaje GOW (Global Ocean Waves) y DOW (Downscaling Ocean Waves), la marea astronómica GOT (Global Ocean Tide) y la marea meteorológica GOS (Global Ocean Surge). En los párrafos siguientes se hace una breve descripción de cada una de ellas.

GOW y DOW constituyen dos bases de datos que proporcionan una reconstrucción de diversos parámetros del oleaje durante las últimas décadas. GOW cubre todos los océanos del mundo e informa sobre el oleaje hasta aguas costeras (hasta 10 km de resolución espacial en el litoral español). El oleaje está simulado mediante el modelo numérico espectral Wave Watch III, utilizando datos de las agencias NCEP o NCAR y datos de cobertura de hielo. La siguiente etapa consiste en la calibración de las variables del oleaje halladas numéricamente, utilizando datos de altimetría por satélite, descartando valores atípicos. Finalmente se valida por boyas en profundidades indefinidas y boyas costeras para comprobar la calidad de la base de datos obtenida.

Por su parte, la base de datos DOW (Downscaling Ocean Waves) surge como herramienta de reanálisis para la generación de oleaje costero. Esta mejora las ya existentes en tres aspectos básicos:

- i) Cuantitativamente superior.
- ii) Resolución espacial más detallada para describir con más precisión oleaje en aguas someras.
- iii) Incluye procesos de interacción con la batimetría de fondo y procesos locales, que normalmente no son modelados.

La DOW tiene un enfoque híbrido pues combina downscaling dinámico (adecuado al proporcionar una serie de tiempo extensa, de mucha resolución espacio-temporal) con downscaling estadístico (de fácil implementación, efectivo en la estimación de altura en el litoral) reduciendo el esfuerzo computacional.

La metodología propuesta requiere tanto el uso de bases de datos de oleaje en aguas profundas y viento como fuerzas para cubrir un mayor rango de tiempo. Concretamente se hace uso de la GOW (Global Ocean Waves) y de los datos proporcionados por la NCEP o NCAR en cuanto a vientos de superficie. Posteriormente los resultados se calibran mediante comparación con datos instrumentales. A continuación se selecciona un número limitado de casos representativos empleando el MDA (Maximum Dissimilarity Algorithm). Este, explicado a grandes rasgos, comienza con un punto semilla y a continuación busca el caso más dispar al anterior, hasta encontrar los n casos demandados. Es por tanto un algoritmo con gran potencial para hallar casos extremos.

Posteriormente los datos considerados se propagan mediante un modelo numérico a aguas someras. Finalmente se reconstruye la serie de tiempo de los parámetros de estados de mar y se validan para caracterizar finalmente el clima de oleaje mediante alguna técnica estadística. Se ha concluido que la metodología propuesta es precisa para reconstruir estados de mar de H_s , T_p and θ_m en aguas someras. Una última ventaja es la reducción del esfuerzo en tiempo computacional ($\times 1000$) respecto a una simulación continua no-estacionaria de reanálisis de oleaje en costas.

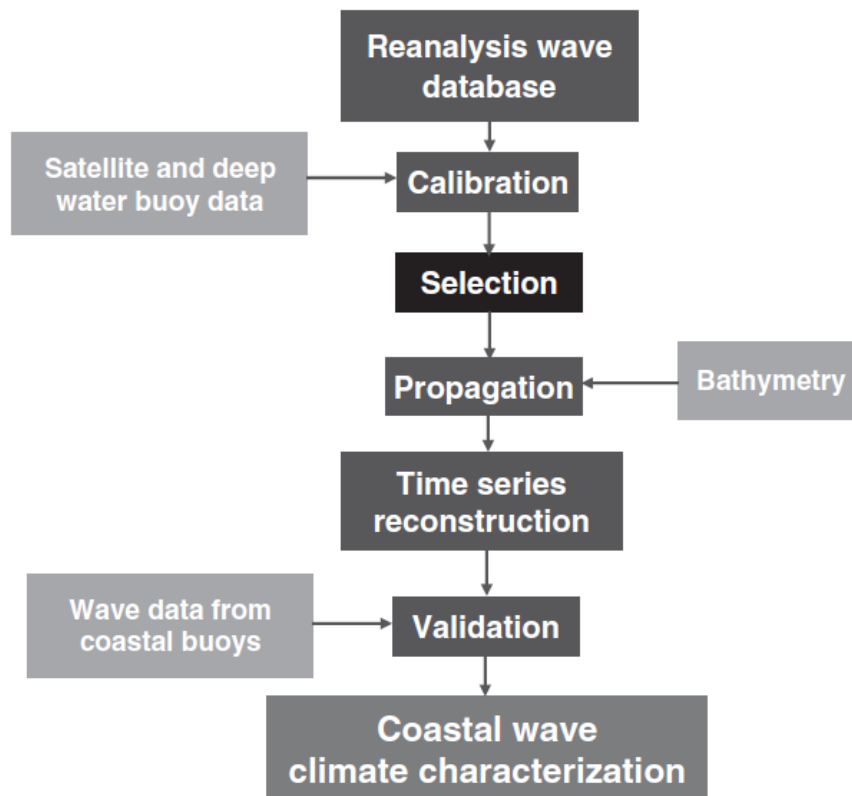


Fig. 7: Marco general para la obtención de bases de datos de oleaje. Extraído de P. Camus et al. (2013)

En lo que corresponde a la GOT, es una aplicación que proporciona la marea astronómica en cualquier parte del mundo. Para describir, en cada posición, la variación del nivel medio del mar debido a la marea astronómica, se ha utilizado el análisis armónico de tal forma que se reconstruye la marea astronómica a partir de las constantes armónicas ajustadas con los datos de los mareógrafos del Organismo Público Puertos del Estado (OPPE). En las posiciones de la costa española en que no se dispone de datos de mareógrafos, se interpolan las constantes armónicas a partir de las determinadas en las posiciones de los mareógrafos más cercanos y posteriormente se reconstruyen las series de marea astronómica a partir de dichas constantes armónicas interpoladas.

Por último, la GOS es una base de datos de reanálisis de marea meteorológica de un periodo de alta resolución realizado en el sur de Europa. El reanálisis proporciona datos de marea meteorológica calculados con una resolución espacial de $1/8^\circ$ y una resolución temporal horaria. El área de estudio engloba el sur de Europa, desde 20°W a 37°W en longitud y desde 25°N a 46°N en latitud, incluyendo el mar Mediterráneo y la costa Atlántica Española. Para ello se combinan un modelo tridimensional de circulación con datos de viento y presión atmosférica de

alta resolución procedentes del downscaling dinámico realizado en el marco del proyecto SEAWIND. Finalmente se validan con mareógrafos de la REDMAR.

En particular, la serie DOW contiene datos de altura de ola significativa, períodos pico y direcciones de oleaje desde el 1 de Febrero de 1948 hasta el 31 de Agosto de 2015. Dichos valores se recogen horariamente. A continuación se exponen las variables de las que se dispone:

```
lat: 28.5020
lon: -16.1852
time: [592416x1] double
forcing: 'SW_NCEP'
zone: 'Iberia'
hs: [592416x1] double
tp: [592416x1] double
wave_dir: [592416x1] double
bat: 21.6751
```

Se dispone también de un vector que contiene la marea astronómica de Tenerife en esas mismas fechas, procedente de la GOT previamente explicada.

```
dt: 1
lat: 28.4772
lon: -16.1859
eje_tiempo: [592416x1] double
```

La serie GOS, de la cual extraeremos principalmente la marea meteorológica, también conocida por su nombre en inglés como storm surge, se extiende sin embargo hasta el 30 de Junio de 2014. Por tanto, solamente se considerará el nivel del mar hasta esa fecha.

Se pierde así la posibilidad de analizar con la información de ambas bases el último temporal importante recogido, que data de finales de agosto de ese mismo año.

```
lat_zeta: 28.4618
lon_zeta: -16.1250
lat_u: 28.4618
lon_u: -16.1875
lat_v: 28.5167
lon_v: -16.1250
time: [582168x1] double
forcing: 'SW_NCEP'
mesh: 'EuropaSur'
zeta: [582168x1] double
u: [582168x1] double
v: [582168x1] double
```

2.3.2. Clima marítimo general.

El régimen del nivel del mar considerado en el presente TFG es el que surge por la combinación de los movimientos de largo periodo asociados a la marea astronómica y meteorológica. A pesar de que estas variables están referidas a un nivel medio del mar en las series de datos, se han modificado con el fin de obtener una mayor claridad, y a posteriori para un mejor manejo del modelo numérico, encontrándose referidas a la Bajamar Máxima Viva Equinoccial (BMVE). Este es el registro más bajo alcanzado, como su nombre indica.

Los datos disponibles se extienden por un período de más de 50 años, sin embargo, dado que los eventos recogidos con mayor calidad de prensa se encuentran en la última década, esta será la de mayor utilidad para el análisis.

La herramienta utilizada para la explotación de las bases de datos ha sido el programa MATLAB. A continuación se muestra la gráfica correspondiente al nivel del mar a lo largo de la serie temporal, así como un mayor detalle en los últimos años:

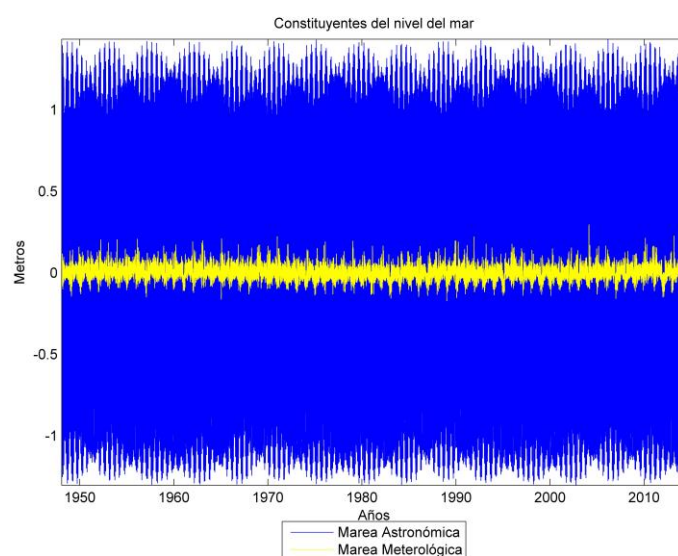


Fig. 8: Comparación entre marea astronómica y meteorológica.

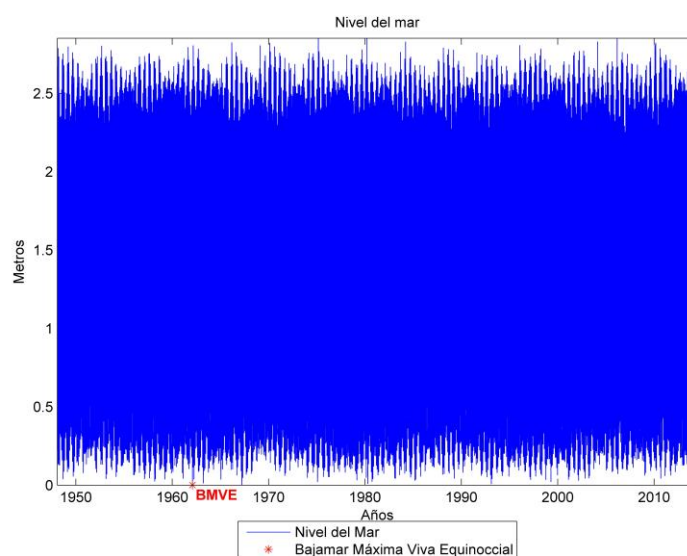


Fig. 9: Combinación de ambas mareas sobre la bajamar máxima viva equinoccial.

Para una mayor comprensión de la situación, se exponen rosas de oleaje, histogramas H_s-T_p y tablas con un resumen de las estadísticas que han sido ejecutadas también con Matlab. El código empleado proviene originalmente de una fuente externa de uso libre, pero ha sido modificado a posteriori para adaptarse al presente caso.

En lo que a las rosas se refiere, el programa permite obtener los cuartiles de altura de ola significativa en sus correspondientes direcciones. Es decir, el valor por debajo del cual se encuentra un determinado porcentaje dado de las mediciones que provienen de las series de datos. Posteriormente se representan conjuntamente cuartiles de altura de ola significativa y dirección seguida. Existen una serie de archivos .m que se encargan de la estética de la representación, los cuales no han sido alterados.

En cuanto al histograma, este es un gráfico que representa la distribución de frecuencias de las parejas de altura de ola significativa y período de pico (el correspondiente a la mayor energía en la función de densidad espectral). La frecuencia es mayor cuanto más cálido sea el color en el histograma. Los puntos sin información se interpolan a partir de los adyacentes, asignándoseles un pseudocolor en la representación.

Las tablas, como se puede apreciar, contienen información estadística para las 16 direcciones principales posibles. En concreto, la probabilidad de seguir dicha dirección, y los percentiles 50, 90 y 99 % de altura de ola significativa, i.e. aquella que no se excede el 50, 90 y 99% de las veces. Menciona aparte la altura de ola significativa que, semejante a la máxima, es superada 12 de las 8760 horas del año.

En las figuras siguientes se aprecia el clima marítimo general:

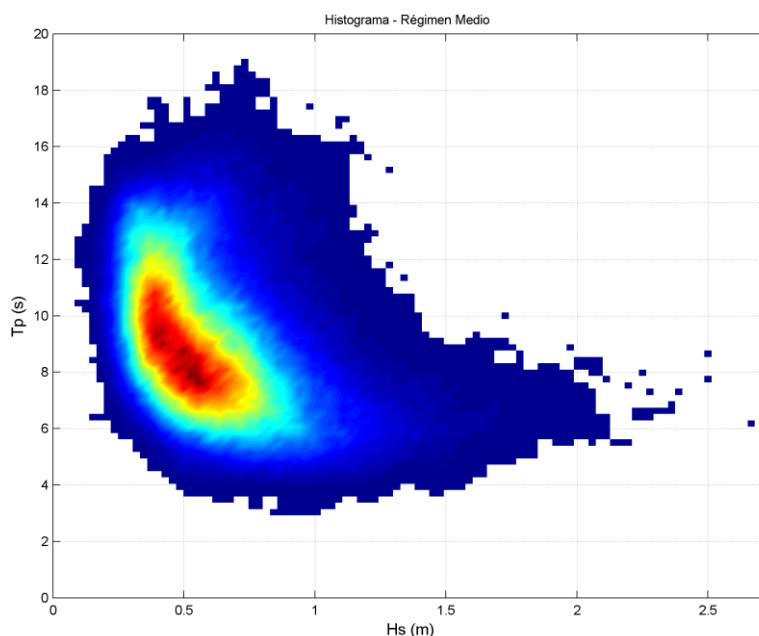


Fig. 10: Histograma de altura de ola significativa vs periodo de pico para el régimen medio.

Podemos observar como existen valores extremos, con altura de ola significativa rondando los 2.5 metros para periodos pico relativamente bajos, aunque sin embargo el régimen medio se caracteriza con H_s de medio metro y periodos entre los 7 y los 10 segundos de duración.

TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0010	0.6652	1.0527	1.3540	1.4558
E	0.3381	0.7082	1.0779	1.4823	1.7440
ESE	0.3247	0.5087	0.8033	1.1204	1.4706
SE	0.1647	0.4113	0.6941	1.0311	1.3652
SSE	0.1061	0.4486	0.7151	1.0965	1.4251
S	0.0625	0.6536	1.1565	1.9235	2.3626
SSW	0.0029	0.8852	1.4477	2.1790	2.5035
SW	0.0000	0.5392	0.5845	0.6504	0.6504
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

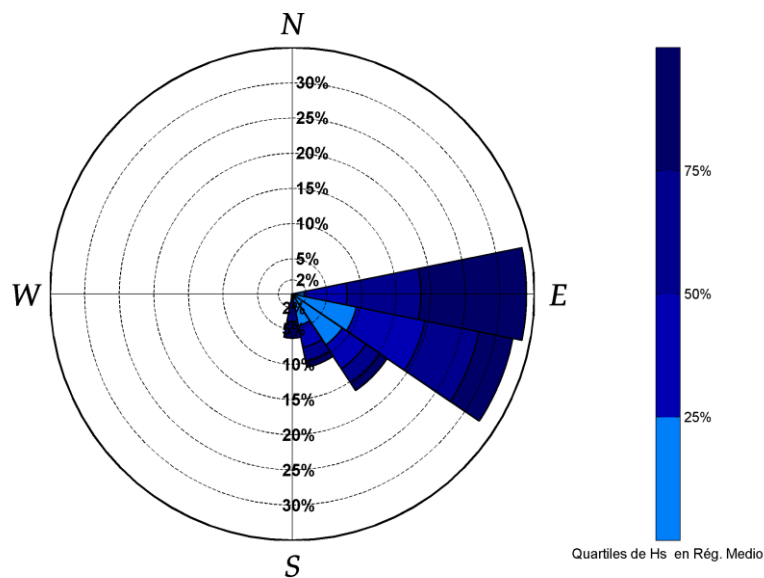


Fig. 11: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma para régimen medio

Basándonos en la rosa de oleaje, es evidente la tónica de una dirección proveniente del este, en declive a medida que giramos hacia el sur. Concretamente, las direcciones E, ESE concentran más del 60% del registro. Como era de esperar dada la localización de San Andrés, se aprecia que el resto de cuadrantes son inexistentes. En cuanto a las alturas de ola, destacan las del S, SSW, considerablemente superiores al resto de direcciones.

2.3.3. Clima marítimo por estaciones del año.

Tal y como se ha expuesto previamente los eventos parecen estar relacionados con la marea astronómica y esta depende en gran medida de la posición relativa de la Tierra y el Sol. Para un análisis más profundo de la situación, que no se limite a considerar las mareas astronómicas, se analizan en esta sección los estados de oleaje en las diferentes estaciones del año. Se disponen a continuación los climas marítimos agrupando los 66 años de datos por estaciones. Para cada una se adjunta la información proporcionada por una rosa de oleaje, un histograma $H_s - T_p$ y una tabla que recoge los principales valores estadísticos de los parámetros más importantes, al igual que se ha realizado con el clima marítimo en general.

➤ Inviernos (22 de Diciembre-21 de Marzo):

TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs _{1,2}
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0021	0.6592	1.0239	1.3371	1.3626
E	0.2868	0.7880	1.2232	1.6145	1.7975
ESE	0.3313	0.5473	0.8711	1.2556	1.7073
SE	0.1844	0.4124	0.6927	1.1553	1.6893
SSE	0.1099	0.4519	0.7251	1.2334	1.5756
S	0.0789	0.7565	1.4324	2.0899	2.5139
SSW	0.0065	0.9008	1.5853	2.3677	2.5108
SW	0.0001	0.5392	0.5845	0.6504	0.6504
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

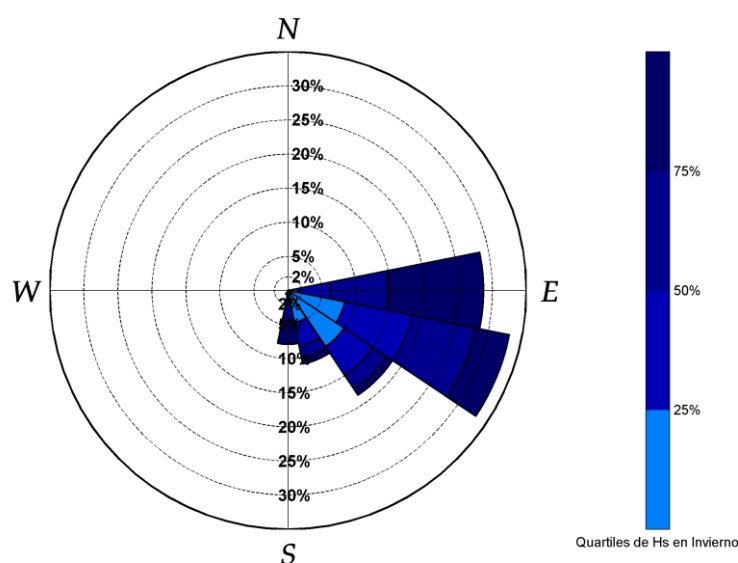


Fig. 12: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en invierno.

En este caso se va incrementando la influencia de los oleajes provenientes de mayor ángulo de dirección (SE y SSE) con respecto a la situación media. Las alturas de oleaje son parecidas al clima marítimo en general, elevadas por el sur, le siguen las del este, y más débiles en la mitad del cuadrante.

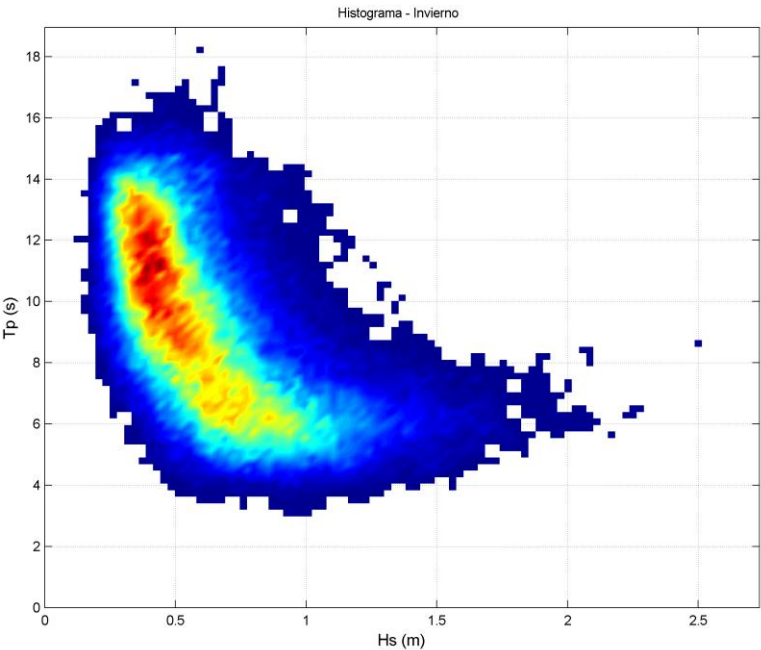


Fig. 13: Histograma de altura de ola significativa vs periodo de pico en invierno

En el histograma se aprecia como los periodos pico son más elevados, entre 10 y 12 segundos en su mayor parte, para una altura de ola significativa que alcanza su mayor frecuencia con 0.4 metros aproximadamente. Es digno de destacar la aparición, aunque poco frecuente, de Hs elevadas, en torno a los 2 metros, con extremos de 2.5 metros.

➤ **Primaveras (21 de Marzo-22 de Junio):**

TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida:Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0010	0.5582	0.7328	0.9861	0.9947
E	0.3545	0.7272	1.0895	1.4340	1.7189
ESE	0.3207	0.4717	0.7241	1.0176	1.3096
SE	0.1552	0.3810	0.6256	0.9383	1.1049
SSE	0.1083	0.4233	0.6481	0.9357	1.0839
S	0.0577	0.5897	0.9435	1.5299	1.7197
SSW	0.0026	0.7869	1.2338	1.6909	1.7169
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

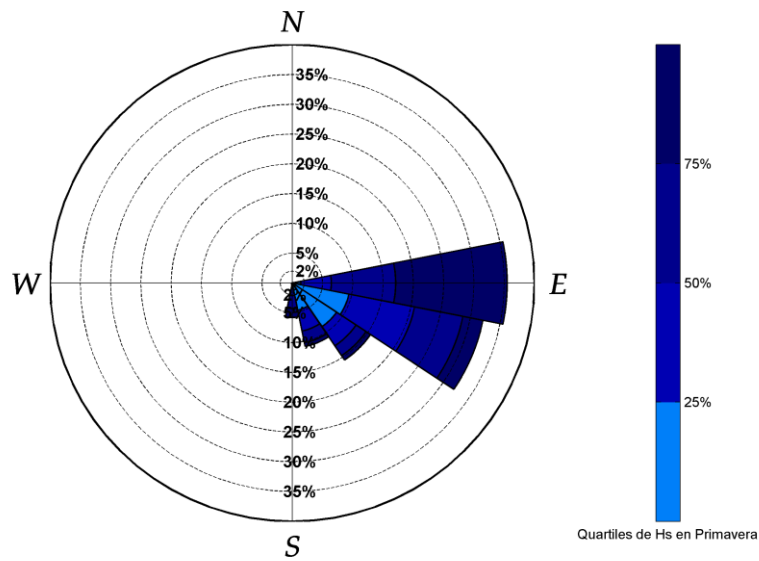


Fig. 14: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en primavera.

Nuevamente se aprecia que E, ESE abarcan la mayor parte de los registros (68%) , descendiendo progresivamente al aumentar el ángulo.

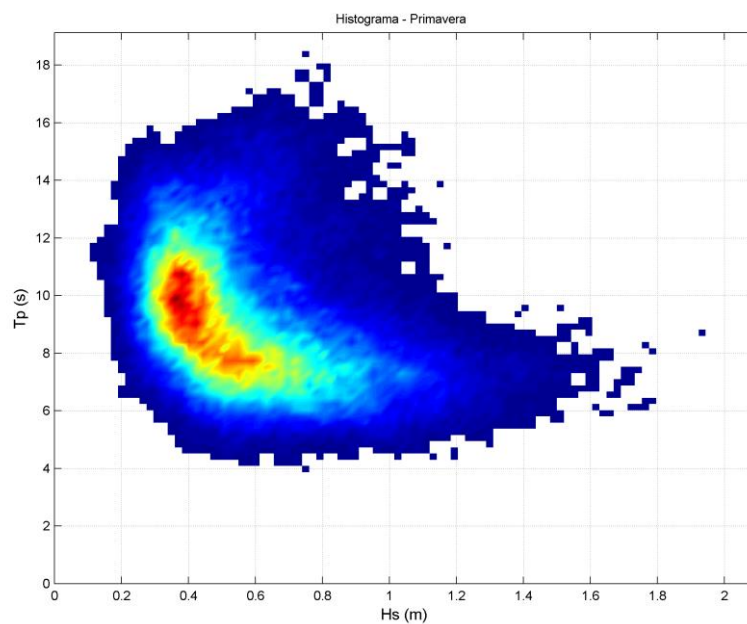


Fig. 15: Histograma de altura de ola significativa vs período de pico en primavera.

En este caso el histograma es similar al del régimen medio. Periodos pico entre 9 y 11 segundos para alturas significativas quizás algo menores, entre 0.3 y 0.4 metros. Respecto a los percentiles hallados, mismo comentario que para el invierno.

➤ Veranos (22 de Junio- 23 de Septiembre):

TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.4941	0.6446	0.8946	1.1490	1.3130
ESE	0.3086	0.4838	0.7552	1.0049	1.1418
SE	0.1126	0.4736	0.7673	1.0044	1.1741
SSE	0.0626	0.5254	0.8375	1.0912	1.2186
S	0.0220	0.6304	0.8289	1.0338	1.1632
SSW	0.0000	0.7799	0.7857	0.7857	0.7857
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

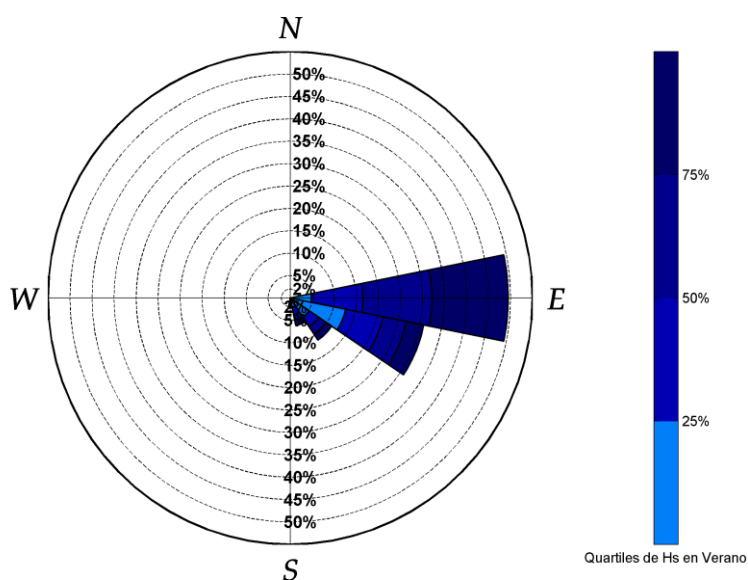


Fig. 16: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en verano.

A la vista de los resultados gráficos está que el mar del Este es el que posee una mayor frecuencia de ocurrencia, superando la mitad de los casos. Sin embargo también tiene una cierta relevancia el ESE (30%), mientras que los del Sur dejan de contribuir. La estadística de percentiles de alturas significantes muestra como son muy parecidos en todas las direcciones de valor no nulo.

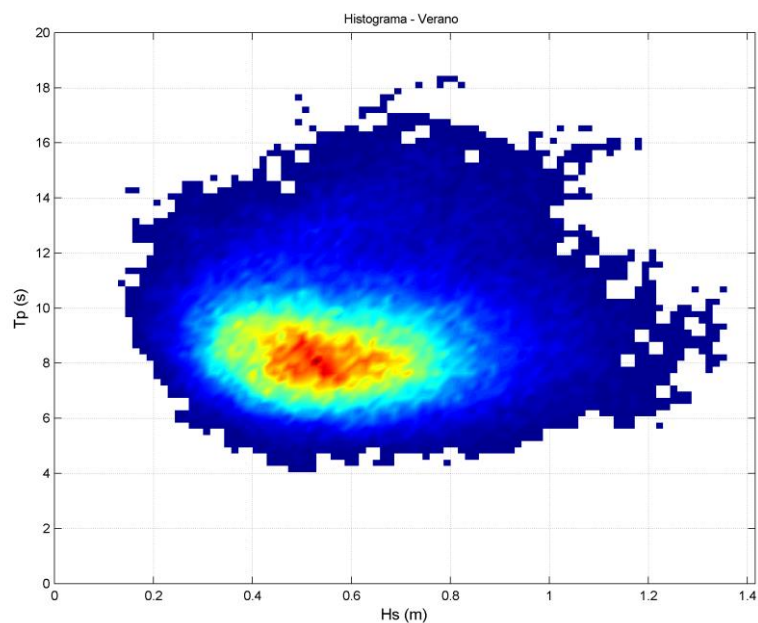


Fig. 17: Histograma de altura de ola significativa vs período de pico en verano.

Los colores del histograma, menos cálidos que anteriormente, muestran como hay un mayor reparto de las parejas Hs-Tp. Podría concluirse que principalmente aumenta ligeramente la altura de ola significativa a 0.5 m y el período vuelve a bajar hasta los 8 segundos.

➤ **Otoños (23 de Septiembre- 22 de diciembre):**

TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0007	0.8067	1.1887	1.4524	1.4620
E	0.2098	0.7966	1.1835	1.6154	1.8526
ESE	0.3379	0.5501	0.8408	1.1626	1.4155
SE	0.2090	0.4127	0.6854	1.0314	1.3212
SSE	0.1437	0.4415	0.6907	1.0596	1.3922
S	0.0958	0.6468	1.1360	1.9020	2.2189
SSW	0.0031	0.9344	1.4137	1.8474	2.0577
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

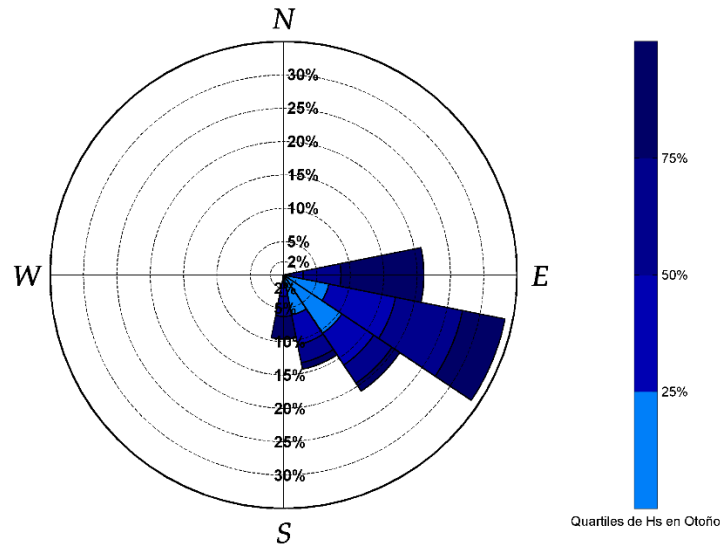


Fig. 17: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en otoño.

En Otoño, la dirección Este-SurEste gana importancia en la rosa de oleaje, así como las de un ángulo superior, perdiéndola el oleaje proviene puramente del Este. Esta dirección alcanza su mínima probabilidad, al igualarse con la del SE, que alcanza su máxima, ocupando el 20% de los casos. Los percentiles de altura significativa vuelven a aumentar en las direcciones sur y este.

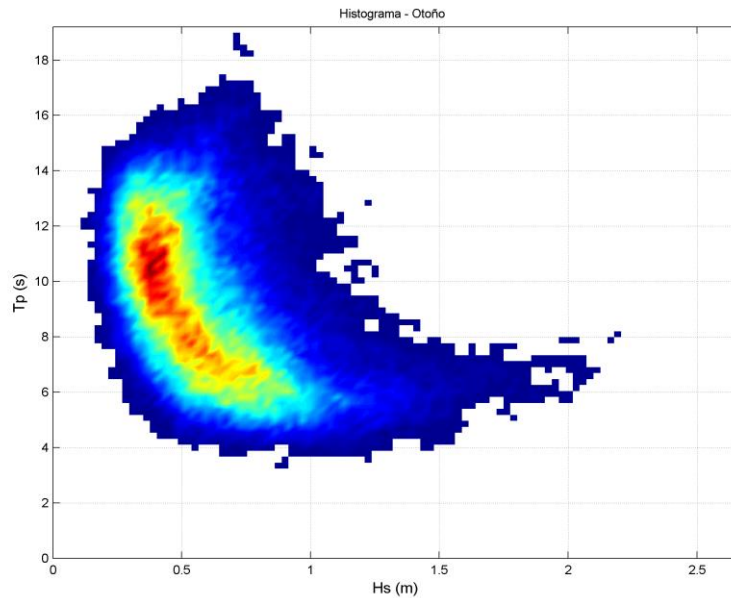


Fig. 18: Histograma de altura de ola significativa vs período de pico en otoño.

El histograma es similar al del invierno, decrecen ligeramente los periodos pico con mayor probabilidad de ocurrencia, concentrándose entre 10 y 12 segundos. La altura de ola significativa realmente parecida, de 0.4 metros de media, vuelve a alcanzar valores de 2 metros.

En conclusión:

- La altura de ola significativa más frecuente se acerca a los 0.4 metros, sin diferencia notable entre estaciones.
- En cuanto a extremos, es frecuente encontrar alturas de ola superiores en otoño e invierno, rondando los 2 metros en varias ocasiones.
- Los periodos pico se encuentran en un rango de 4 a 18 s para todas las estaciones.
- Los periodos pico más frecuentes son más elevados en invierno y otoño (10-12 s), descendiendo en primavera hasta su mínimo en verano (8 s).
- En lo que a direcciones se refiere, se aprecia como desde el otoño, el ESE va perdiendo influencia. Concretamente el SE desciende ligeramente y el E aumenta en invierno. No obstante en las primaveras se imponen la dirección E y ESE, concluyendo en verano con un evidente predominio del oleaje del Este.
- La semejanza entre histogramas cambia en verano, adquiriendo un swell menor y una forma más circular, es decir, mayor reparto de frecuencias en torno a unos valores centrales.
- Este último hecho se confirma al concluir que los diversos percentiles de altura de ola significativa, que se pueden apreciar en la tabla estadística, son muy similares en todas las direcciones en verano. Sin embargo, en el resto de estaciones es claramente mayor en las direcciones del Sur y el Este que en componentes intermedias.

2.3.4. Clima marítimo de los eventos de inundación.

La presente sección tiene el objetivo de mostrar todas las características asociadas a los eventos de inundación recogidos en el capítulo 2.1.

Con el fin de no centrar el estudio en una solución que podría ser demasiado específica a continuación se presenta un rango de valores que se obtiene incluyendo en el análisis un cierto entorno de días anteriores y siguientes a la fecha indicada en cada noticia recogida en prensa. De este modo es más sencillo identificar tendencias comunes en los parámetros del que gobiernan los rebases.

En este caso, no es posible mostrar histogramas debido la brevedad temporal, pero sí es interesante la recopilación de las características de la marea astronómica, que exponen y contrastan la teoría señalada anteriormente con la realidad. De esta manera se refuerza la investigación realizada la sección 2.2.1. Se recogen en la siguiente tabla:

Fecha considerada	Carrera M.A. [m]	Máximo [día-h]	Mínimo [día-h]	Máximo [m]	Mínimo [m]
03/01/1999- 08/01/1999	2.2971	03/01/1999-2AM	03/01/1999-8AM	1.1757	-1.1214
30/06/2007- 05/07/2007	1.9589	03/07/2007-3PM	02/07/2007-9PM	1.0246	-0.9343
20/12/2010- 26/12/2010	2.1313	23/12/2010-2AM	23/12/2010-8AM	1.092	-1.0393
26/08/2011- 01/09/2011	2.6435	30/08/2011-2PM	30/08/2011-8PM	1.4324	-1.3049
04/02/2012- 09/02/2012	2.398	09/02/2012-2AM	09/02/2012-8AM	1.2501	-1.1479
16/06/2012- 21/06/2012	1.8242	20/06/2012-2PM	20/06/2012-8PM	0.8169	-0.8116
29/05/2014- 3/06/2014	1.9396	29/05/2014-2PM	29/05/2014-8PM	0.9705	-0.9692
24/08/2014- 30/08/2014	1.9863	27/08/2014-2PM	26/08/2014-8PM	1.0349	-0.9514

Tabla 3: Parámetros asociados a la marea astronómica en los eventos de inundación.

Y a continuación se expone la caracterización de cada uno de los eventos. Además de las rosas de oleaje con sus tablas estadísticas se aportan gráficas del nivel del mar, altura de ola significativa, direcciones y periodos de pico con el tiempo.

➤ **6-7 de Enero de 1999**

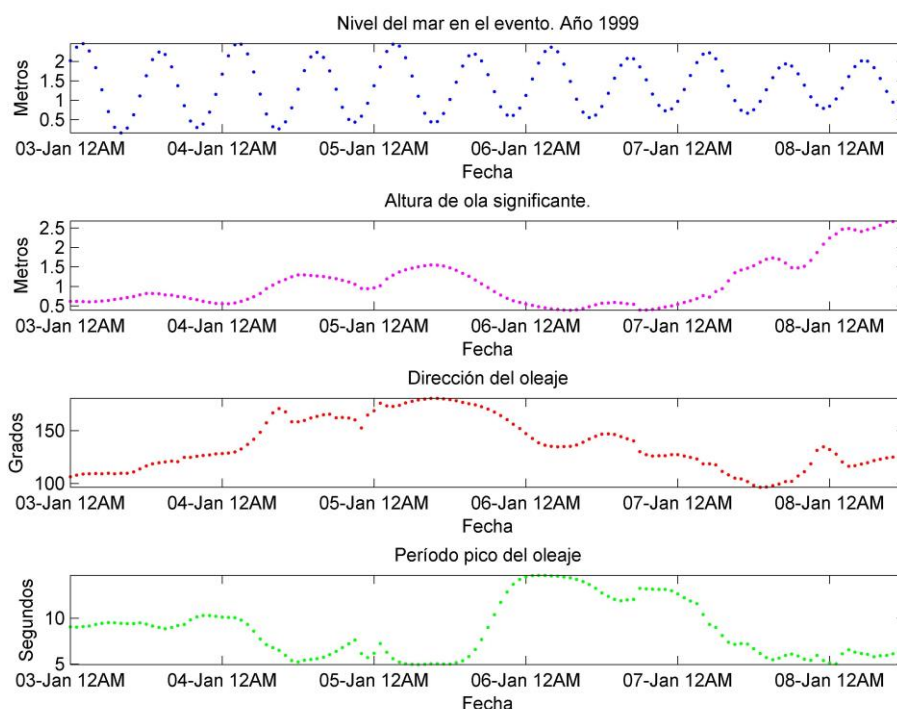


TABLA ESTADÍSTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0376	1.6968	1.7337	1.7337	1.7337
ESE	0.2932	0.8148	2.4598	2.5700	2.5700
SE	0.3233	0.5573	2.4049	2.6818	2.6818
SSE	0.1955	0.9903	1.2820	1.2931	1.2931
S	0.1504	1.3549	1.5390	1.5523	1.5523
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

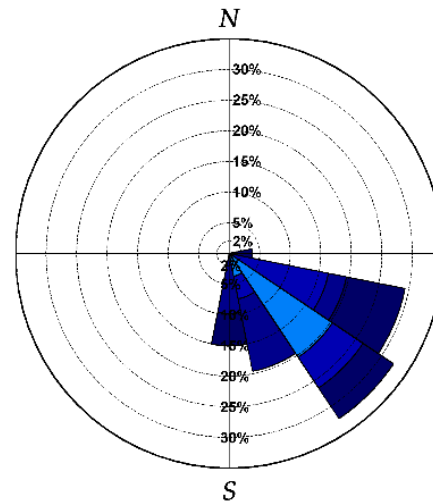


Fig. 18: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Enero 1999.

La inundación acaecida el entre el 6 y 7 de Enero según la fuente, podría caracterizarse por sus periodos pico que prácticamente alcanzan los 15 segundos. ESE y SE son las direcciones más acusadas, que se corresponden con Hs muy elevadas según la estadística. Aunque la carrera de marea máxima ocurre el día 3 esta no posee un oleaje representativo.

➤ **3 de Julio de 2007**

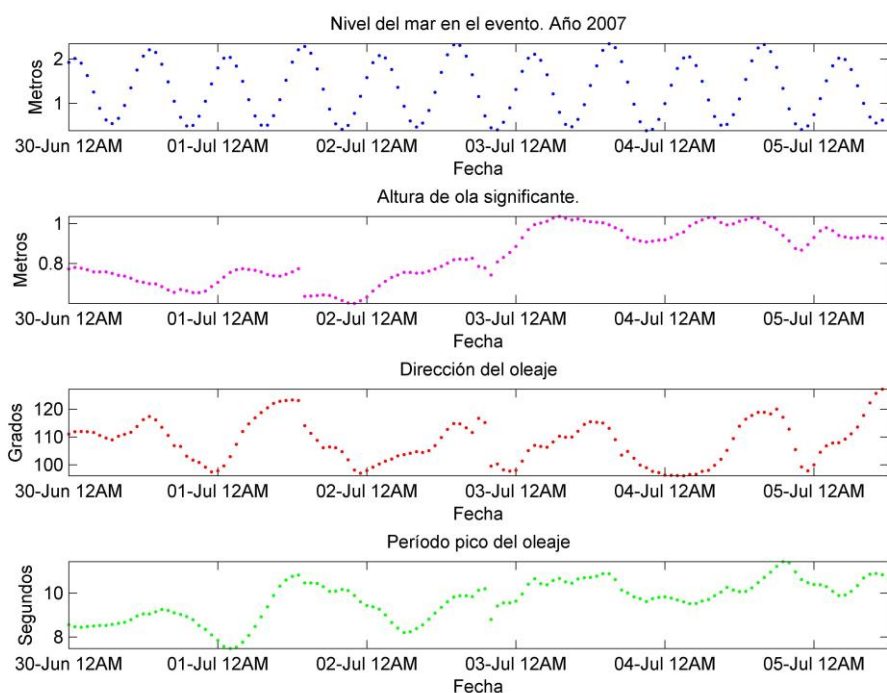


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{95%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.2331	0.8862	1.0116	1.0304	1.0304
ESE	0.7444	0.7785	1.0127	1.0338	1.0368
SE	0.0226	0.9264	0.9296	0.9296	0.9296
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

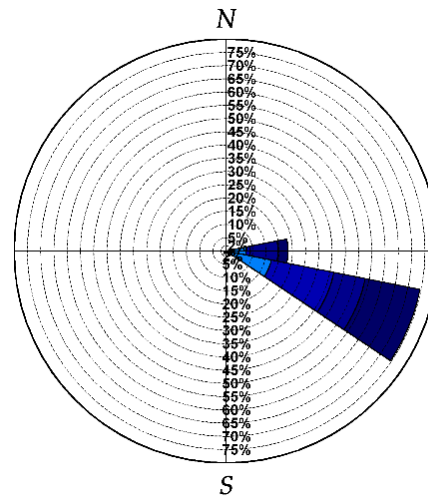


Fig. 19: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Julio 2007.

La dirección ESE adquiere toda la relevancia, con cierta aportación de la puramente Este, típica del verano como se ha visto previamente. Ambas rondan la misma Hs. La inundación dice ser ocurrida el día 3, en ese momento la carrera de marea es máxima con Hs de 1 metro y el periodo pico en aumento (>10 s).

➤ **22 de Diciembre 2010**

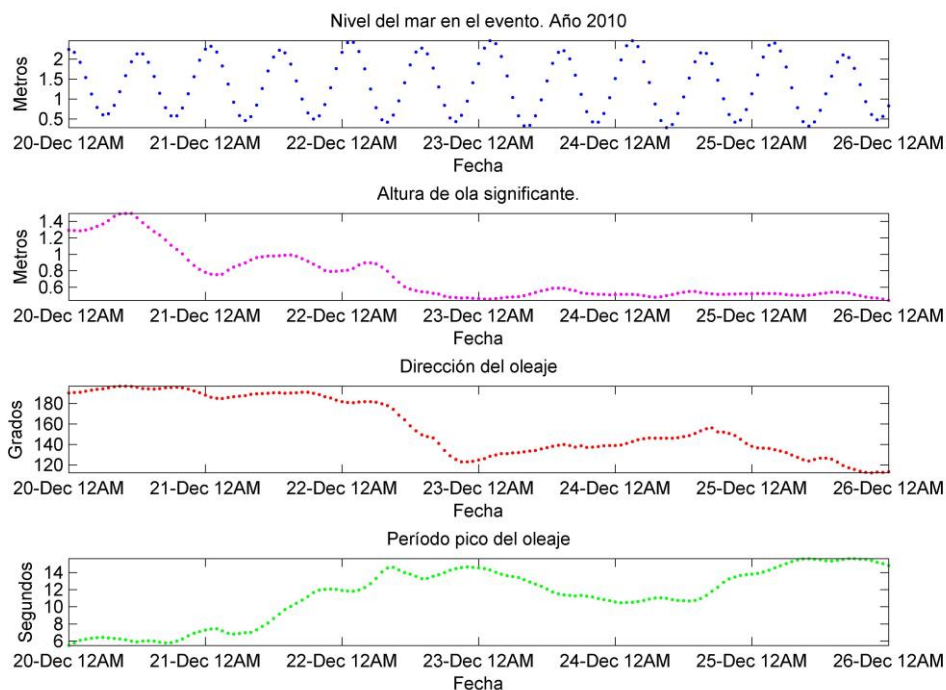


TABLA ESTADÍSTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0897	0.4732	0.5350	0.5392	0.5392
SE	0.3724	0.5128	0.5588	0.5897	0.5899
SSE	0.1310	0.5279	0.5702	0.6067	0.6067
S	0.2690	0.8718	0.9917	1.2927	1.2927
SSW	0.1379	1.3232	1.4943	1.4987	1.4987
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

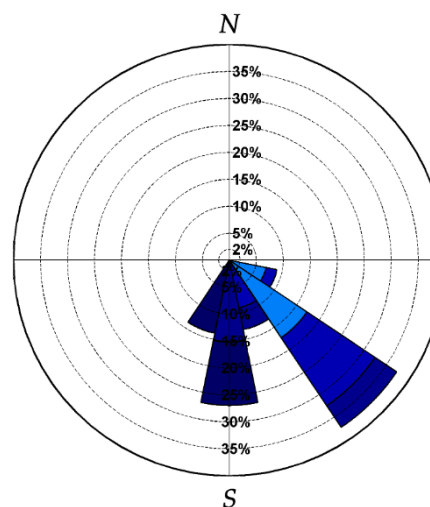


Fig. 20: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Diciembre 2010

El evento se indica para la fecha del 22 de diciembre de 2010, ocurriendo la carrera máxima un día después. No obstante, la Hs decae más de medio metro hasta ese momento. El periodo pico ronda los 12 s y la dirección es más elevada que por lo general, proviniendo del Sur.

➤ **29-31 de Agosto 2011**

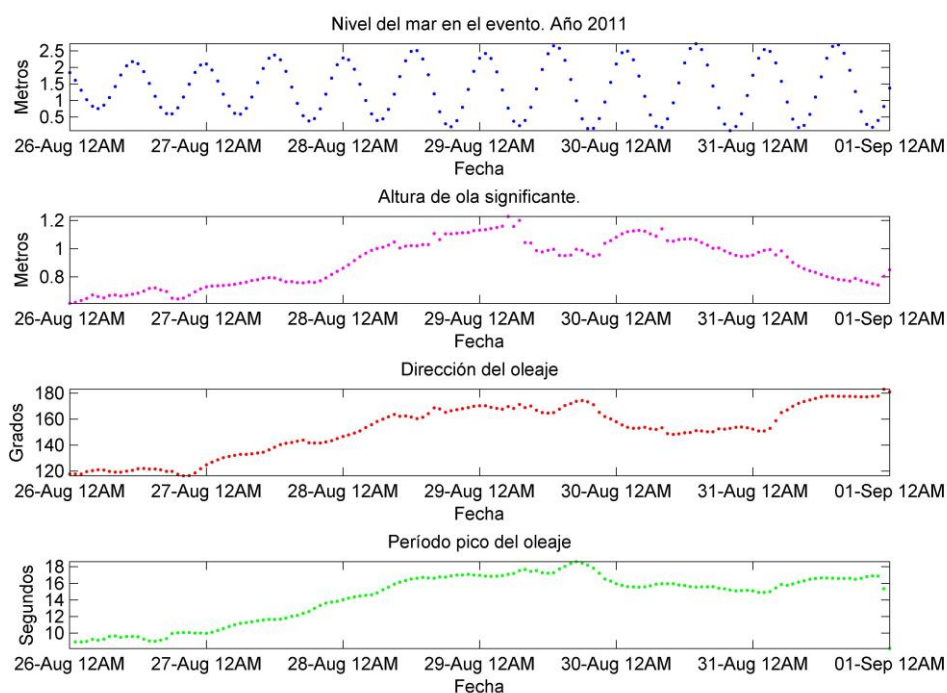


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.1655	0.6704	0.7153	0.7212	0.7212
SE	0.1655	0.7645	0.7971	0.8388	0.8388
SSE	0.4414	1.0233	1.1246	1.1595	1.1597
S	0.2276	0.8768	1.1371	1.2298	1.2298
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

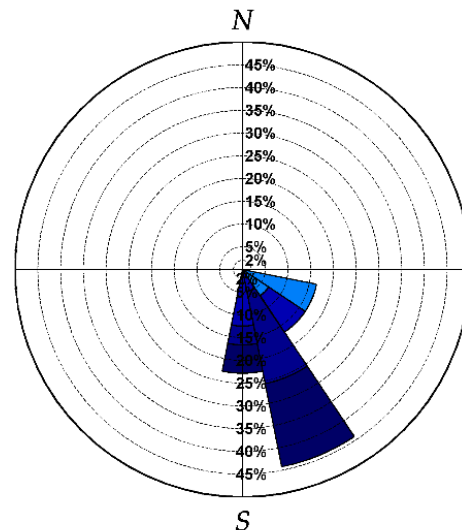


Fig. 21: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Agosto 2011.

Este evento fue el más perjudicial y se extendió los días 29, 30 y 31 de Agosto. El pico en la carrera de marea ocurre el día 30, con alturas de ola significantes de 1 m. Se aprecia como a partir del día 28 todas las variables aumentan. La dirección SSE (160°) es la predominante en este caso, y junto a la puramente del Sur registran las olas más elevadas.

➤ 5 Febrero 2012

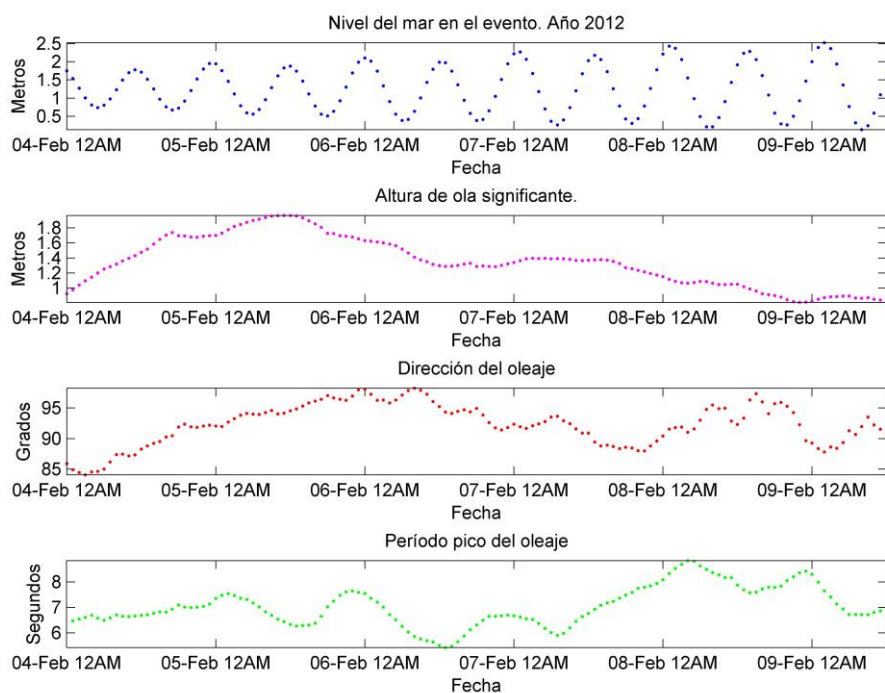


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	1.0000	1.3406	1.8226	1.9654	1.9661
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

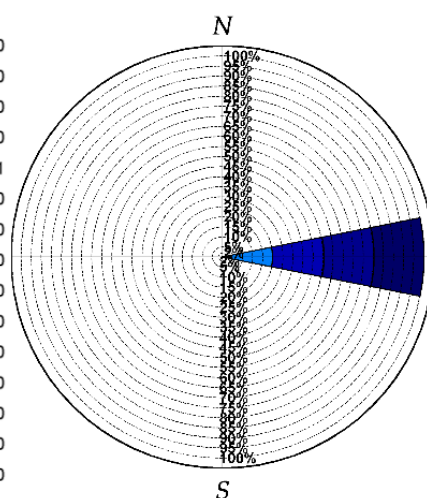


Fig. 22: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Febrero 2012.

Lo primero que llama la atención de este evento es su dirección, muy concreta, exactamente del Este. Además la altura de ola significativa es relativamente muy elevada, de casi 2 metros en el momento indicado por la noticia: la pleamar del día 5. A pesar de que la máxima carrera de marea ocurre el día 9, hay una reducción substancial en la Hs y según la hemeroteca en ese momento no ocurre ninguna inundación. Los períodos son relativamente bajos (7 s), atípico según el clima marítimo estacional.

➤ **17 de Junio 2012**

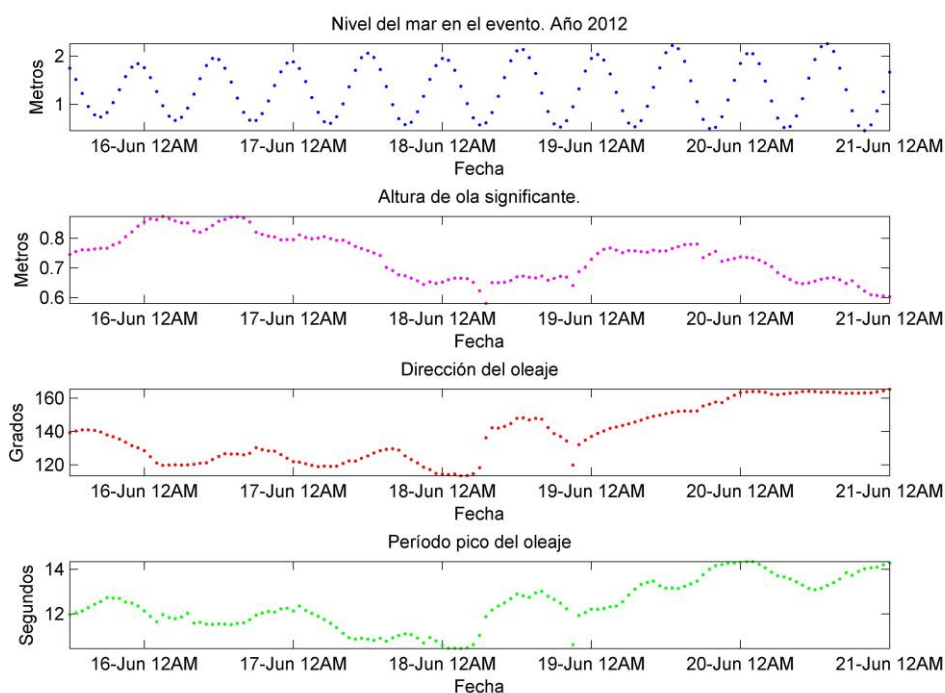


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.2556	0.7944	0.8589	0.8737	0.8737
SE	0.3985	0.7606	0.8584	0.8712	0.8712
SSE	0.3459	0.6781	0.7644	0.7799	0.7799
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

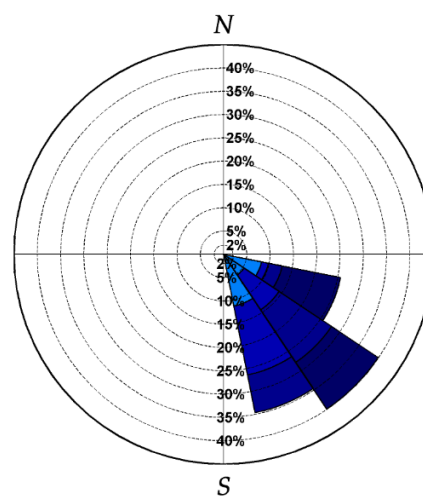


Fig. 23: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Junio 2012.

Este evento de inundación ocurre según la noticia el 17 de junio a pesar de que el día 20 ocurre la máxima carrera del nivel del mar. Aunque apenas decrece la Hs del 17 al 20, pues desciende de 0.8 a 0.67 m, pueden apreciarse otras diferencias. La dirección es bastante concreta en el evento (120-130°) y el período pico excede ligeramente el estacional con unos 12 s. Esto se opone a una dirección mucho más elevada en torno a los 160° y periodos que superan los 14 s el día 20. Por tanto se comienzan a percibir características comunes en los rebases.

➤ **1 de Junio 2014**

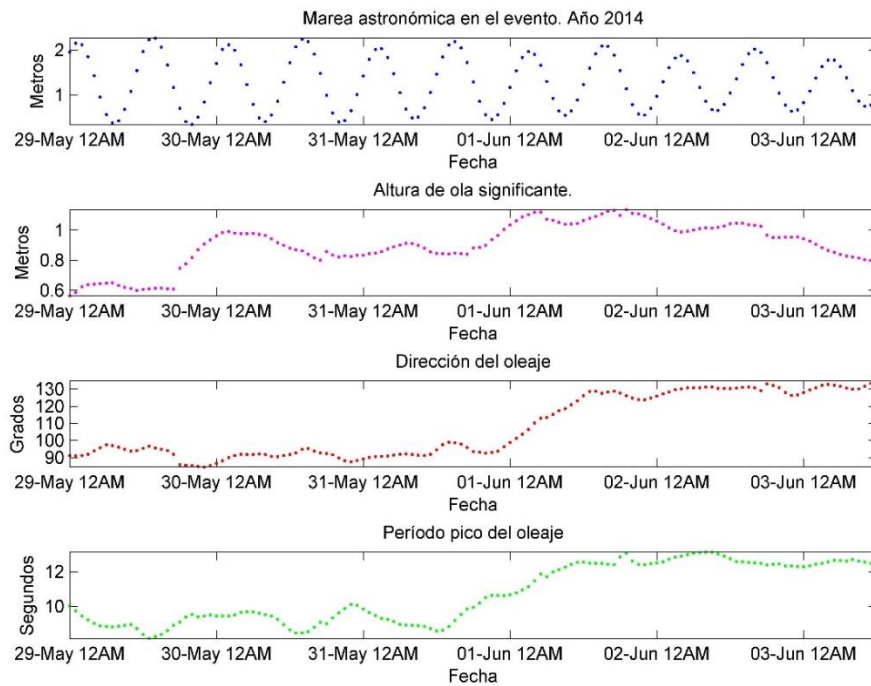


TABLA ESTADÍSTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob. direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.5489	0.8468	0.9769	1.0274	1.0343
ESE	0.0902	1.0685	1.1185	1.1191	1.1191
SE	0.3609	1.0118	1.1088	1.1369	1.1369
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

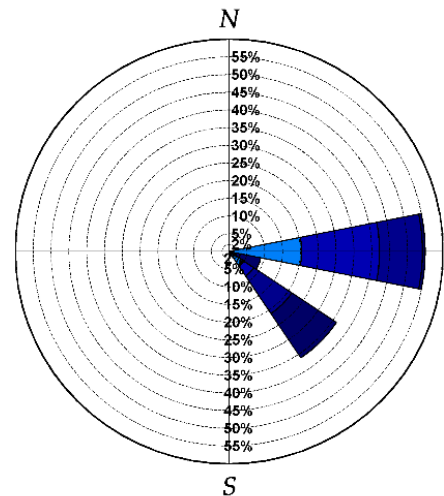


Fig. 24: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Junio 2014.

La fuente indica los efectos del rebase del mar el primer día del mes de junio, que no es coincidente con el día de máxima carrera de marea (29 de mayo), probablemente debido a la escasa altura del oleaje. Desde entonces se observa la tendencia de un aumento en las tres variables, hasta obtener los valores ya habituales en los eventos de inundación de San Andrés: periodo de pico de 12 segundos, dirección de 110-130° y en este caso altura de ola significativa algo superior a 1 metro.

➤ **26 y 27 de Agosto 2014**

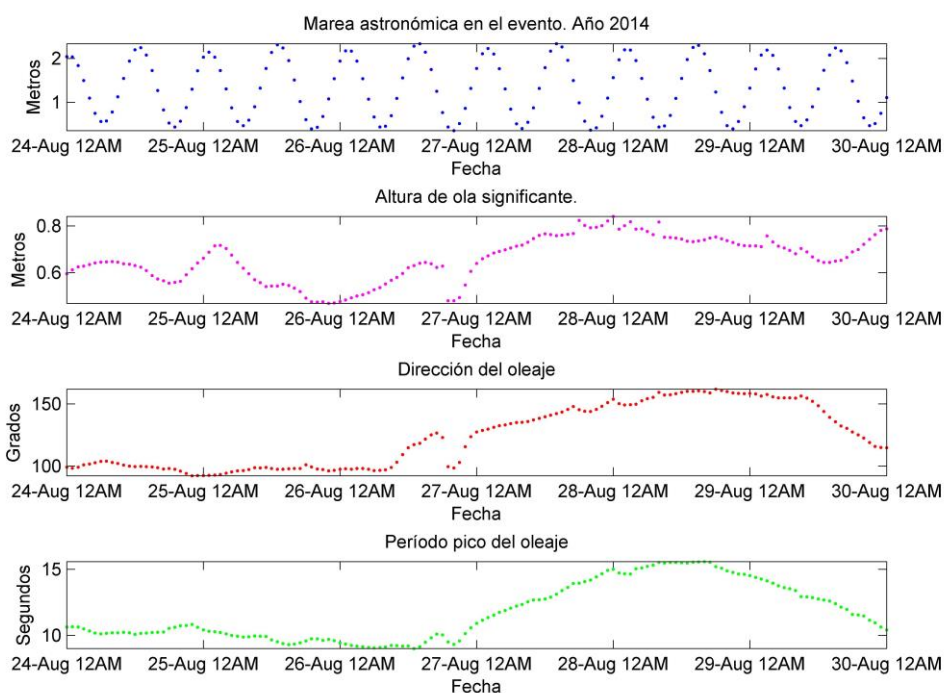


TABLA ESTADÍSTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.3724	0.5602	0.6626	0.7168	0.7169
ESE	0.1448	0.6412	0.7697	0.7874	0.7874
SE	0.2069	0.7019	0.7932	0.8233	0.8233
SSE	0.2759	0.7418	0.8089	0.8407	0.8407
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

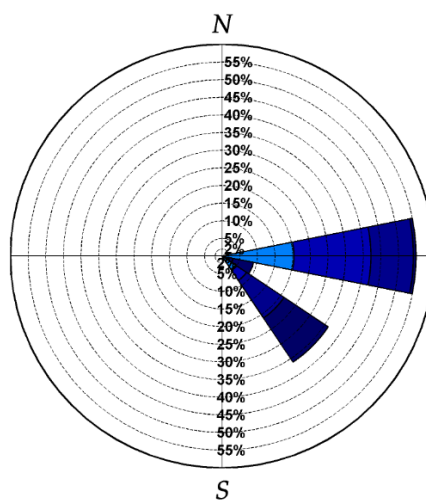


Fig. 25: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Agosto 2014.

El suceso acaecido entre el 26 y 27 de Agosto de 2014 coincide con la máxima carrera de marea dada por la luna nueva. El evento tiene una dirección de entre 100 y 130° que corrobora las anteriores. Los periodos pico (10 s) y alturas de ola significantes (0.6 m) son ligeramente inferiores.

2.4. Diagnóstico de características de los eventos pasados.

Puesto que el objetivo principal del presente TFG es la caracterización de los sucesos de inundación en San Andrés, para posteriormente diseñar una protección costera, se ha considerado necesaria una sección aparte para discutirlos en detalle.

Para una visualización más clara se muestra a continuación una tabla con los valores de los principales parámetros en el intervalo temporal.

Fecha considerada	Carrera N.M [m]	Máximo N.M.	Mínimo N.M.	T_p [s] en evento	Dirección [°] en evento	H_s [m] en evento	H_s [m] para máxima M.A.
03/01/1999-08/01/1999	2.30	03/01/1999-2AM	03/01/1999-8AM	12-14.7	126-147°	0.59	0.61
30/06/2007-05/07/2007	1.95	03/07/2007-3PM	02/07/2007-9PM	9.6-10.9	97-115°	1.04	0.99
20/12/2010-26/12/2010	2.18	23/12/2010-2AM	24/12/2010-9AM	11.8-14.6	123-182°	0.90	0.46
26/08/2011-01/09/2011	2.63	30/08/2011-2PM	30/08/2011-8PM	14.9-18.6	148-177°	1.23	1.06
04/02/2012-09/02/2012	2.39	09/02/2012-2AM	09/02/2012-8AM	6.3-7.6	92-98°	1.97	0.87
16/06/2012-21/06/2012	1.81	20/06/2012-2PM	20/06/2012-8PM	10.6-12.4	114-130°	0.81	0.67
29/05/2014-3/06/2014	1.93	29/05/2014-2PM	29/05/2014-8PM	10.6-13.1	99-129°	1.14	0.61
24/08/2014-30/08/2014	-	-	-	9.4-13.2	98-137°	0.77	0.76

Tabla 4: Recopilatorio de las variables principales en los eventos de inundación.

Nótese que esta vez hace referencia al nivel del mar total (el último caso no ha sido resuelto debido a la inexistencia de datos de marea meteorológica como se comentaba previamente).

Comparando esta tabla con la información mostrada en la Tabla 3, destacar primeramente la coincidencia de instantes en los que la carrera de marea astronómica y del nivel del mar son extremos. Lo que demuestra su gran relevancia como componente del mismo.

Las diversas características impiden ver claramente una sola familia de oleaje para los sucesos acaecidos. En un intento de agrupar los eventos de inundación por conjuntos podríamos distinguir 2 grandes casos o familias en base a la dirección de procedencia.

Por una parte una familia A, indicada en negrita en la tabla, cuyas direcciones se encuentran entre 120° y 180° aproximadamente. Por otro lado, una familia B, indicada en cursiva, con direcciones cuyo rango oscila entre los 90° y 140°.

De ellas se pueden extraer los siguientes patrones:

- Todas se producen coincidiendo en mareas vivas y contribuyen con una carrera de al menos 2 metros, aproximadamente, llegando a existir casos más excepcionales. Únicamente los eventos de enero de 1999 y junio de 2012 se producen con una diferencia de 3 días respecto al instante álgido de la carrera de marea, pero aun con todo, esta es casi contigua, y cabe recordar que en intervalos de tiempo tan acotados la diferencia de mareas astronómicas es muy limitada. Es por tanto, un factor clave en las inundaciones de San Andrés.
- Para ambas familias las alturas de ola significantes son similares, entre 1 y 2 m. No obstante, para la familia B se presentan las alturas de ola significantes máximas de 1.97 m, mientras que para la familia A se recogen las mínimas entre 0.59 y 0.9 m.
- La familia A, con oleajes provenientes del Sur al Sureste, presenta los mayores periodos de pico, entre 10 y 18 s, mientras que los oleajes de la familia B recogen periodos de pico entre 6 y 13 s aproximadamente.
- La familia A, al contar con periodos mayores y direcciones del Sur a Sureste, permite pensar que provienen de temporales lejanos generados en el hemisferio sur, en donde la dispersividad del oleaje ya ha reordenado los periodos del espectro generando un comportamiento típico tipo SWELL, tal y como se comentaba en la sección 2.5.2. Los oleajes de la familia B en cambio, se relacionan con temporales generados al este de la isla de Tenerife. Estos se desarrollan en un fetch más limitado geográficamente y por lo tanto, alcanzan periodos menores.
- En cuanto a la probabilidad de ocurrencia, se ha analizado la base de datos en búsqueda de registros que cumplan:
 Familia A: $0.5 < H_s < 1.0$ m, $10 < T_p < 18$ s, $140^\circ < Dir < 190^\circ$, nivel > 2.0
 Familia B: $1.0 < H_s < 2.0$ m, $6 < T_p < 13$ s, $90^\circ < Dir < 140^\circ$, nivel > 2.0
 Y se ha llegado a la conclusión de que la familia A se ha dado un 0.934% del tiempo total registrado y la B un 0.289%.
- En lo que refiere a las estaciones del año en las que se dan dichos eventos, se muestra en la siguiente tabla resumen como la familia A es más común en los meses de verano y otoño, siendo la B mucho más frecuente en invierno y primavera:

Estación	Familia A	Familia B
Primavera	23.17%	30.62%
Verano	26.35%	23.32%
Otoño	28.52%	14.96%
Invierno	21.96%	31.10%

Tabla 5: Porcentaje de ocurrencia de cada familia según la estación del año.

En conclusión, ambas familias se pueden asimilar en los siguientes dos tipos de oleaje representativo para proceder a su estudio de forma aislada y para poder verificar numéricamente tanto el comportamiento actual de la zona costera como su comportamiento tras la propuesta de alternativas de mejora (se seleccionan los valores medios postrados en las gráficas y tablas correspondientes a este capítulo).

- Familia A: $H_s=1$ m, $T_p=16$ s, $Dir=158^\circ$ N (SSE) y nivel del mar de +2.3 m.
- Familia B: $H_s=1.5$ m, $T_p=10$ s, $Dir=100^\circ$ N (S80E) y nivel del mar de +2.3 m.

Para resumir el trabajo se cree conveniente emplear estos dos oleajes a la hora de plantear y verificar las alternativas propuestas.

3. ANÁLISIS DE INTERACCIÓN DEL OLEAJE CON LA COSTA.

3.1. Introducción.

Finalizada una primera parte de investigación del clima marítimo, esta sección tiene por objetivo verificar los eventos de inundación mediante el software Celeris, para proceder a realizar un primer diseño de posibles protecciones costeras para evitar su ocurrencia.

Los parámetros registrados a partir de las bases de datos en los puntos correspondientes han de ser propagados a la costa de San Andrés. En dicho recorrido, el oleaje sufre una serie de transformaciones que tienen un modelado factible como las debidas a la batimetría (asomeramiento, refracción, reflexión, difracción...), a la influencia del viento, etc.

Para ello se han desarrollado, especialmente en las últimas décadas, modelos físicos y numéricos. Estos modelos tienen ventajas e inconvenientes dependiendo del caso, complementándose frecuentemente.

En el caso de los modelos físicos, cabe destacar fundamentalmente su coste y dificultad de implementación, así como de realizar cambios y mediciones, ya que pueden afectar a la propia reproducción del fenómeno. Otra limitación fundamental es la semejanza dinámica: no existe ningún fluido que permite mantener constantes todos los números adimensionales (F, R, M, V , y E) entre modelo y prototipo. Por ello, sólo se pueden considerar los dos tipos de fuerzas preponderantes en el fenómeno que se quiere analizar. Por último, existen efectos inevitables del modelo con impactos negativos en su reproducción, como pueden ser la reflexión/ mala disipación de ondas en el contorno, o generación de olas secundarias falsas en las palas.

El uso de modelos físicos se debe limitar a aquellos procesos de difícil descripción matemática, como pueden ser la generación de vórtices, la fuerza de impacto del oleaje rompiendo o la disipación pobre de energía. Asimismo, es necesario para la validación de modelos numéricos o proyectos de gran relevancia.

Por su parte, los modelos numéricos, tienen la gran ventaja de su bajo coste y la amplia gama de configuraciones y opciones que ofrecen. Además, resuelven los problemas en cuanto a escala y obtención de datos (contemplando la posibilidad de adquirir datos por superficies y no solo puntuales, sin alterar el experimento). Una última virtud de los modelos numéricos es la capacidad de compartir conocimiento y códigos “open-source” gratuitos que permiten involucrar a más comunidad científica para su mejora y validaciones.

La principal desventaja es el basarse en parametrización de procesos físicos y el uso de hipótesis que pueden alejarse de la realidad. Otra característica, que puede llegar a ser una debilidad, es la dependencia de la malla empleada. Una mayor resolución conlleva mayor precisión en el resultado, aunque a mayor coste computacional (lo que se materializa en tiempo invertido en el modelaje). Cabe destacar que no importa cuán precisa sea la malla que definamos que siempre existirán procesos dentro de la celda que no son simulados. En los últimos años se ha mejorado sustancialmente la potencia de las computadoras y han nacido nuevos métodos que permiten mejorar el manejo de modelos, a mayor escala y durante más tiempo de simulación.

“Essentially, all models are wrong, but some are useful”
George E.P. Box (1919)

3.2. Metodología propuesta.

3.2.1. Modelaje numérico.

Expuestas las fortalezas y debilidades de cada uno de los métodos, es lógico emplear para este caso el modelaje numérico. Para ello existe una amplia gama de software que se adecua en mayor o menor medida a nuestras necesidades...

En cualquier proceso de modelaje numérico se han de distinguir tres fases:

- El pre-proceso. En primer lugar es necesario comprender plenamente el problema físico para decidir las hipótesis y simplificaciones a emplear. Además, es la parte del análisis en la que se define malla y su resolución, así como la topografía y batimetría u otras geometrías. Es el momento de seleccionar un método de discretización, como diferencias finitas, espectral, de frontera, hidrodinámica de partículas suavizada... de acuerdo a las características a estudiar. Finalmente, se de determinar las propiedades del fluido y condiciones de contorno.
- La resolución. En esta fase se resuelven las ecuaciones inherentes al modelo utilizado. Las ecuaciones básicas para describir cualquier flujo son las de Navier-Stokes, pero dada su complejidad computacional se recurre a formas simplificadas. Las más utilizadas asumen la omisión de los términos de viscosidad (ecuaciones de Euler) o vorticidad (ecuaciones potenciales).
- El post-proceso. Consiste en no sólo aportar la gran cantidad de datos, normalmente en forma numérica, que el modelo ha resuelto, si no en mostrarlos de una forma clara, a través de gráficas o tablas u otro tipo de visualizaciones de sencilla interpretación.

3.2.2. Modelos numéricos disponibles.

A continuación se comentan los principales modelos numéricos de acuerdo a su proceso resolutivo, sin entrar en un análisis exhaustivo, con la finalidad de seleccionar el más adecuado para el presente proyecto. Esto es necesario ya que, como se indicaba previamente, la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en su totalidad se hace inviable computacionalmente, siendo las que describirían el fenómeno de la forma más precisa.

Por un lado, aquellos que consideran el *flujo potencial*, asumiendo que la turbulencia es despreciable cuando los efectos de viscosidad son pequeños y el flujo es irrotacional sin fricción. Esta hipótesis de irrotacionalidad implica la incapacidad de describir la rotura o overturning del oleaje y por tanto no debe emplearse en dichas situaciones, o en la interacción de olas con cuerpos de pequeño tamaño.

Existen también modelos de *presión hidrostática*, en los que la ecuación de momento vertical se reduce a una aproximación del balance hidrostático y la componente vertical de la velocidad se calcula a partir de dicha ecuación.

En esta línea se dirigen las ecuaciones *de aguas someras*, que asumen un movimiento de partículas básicamente horizontal, donde las aceleraciones verticales son despreciables y los gradientes de presiones verticales hidrostáticos. La hipótesis fundamental es que la longitud de onda es mucho mayor a la profundidad.

Por otra parte se encuentran los modelos basados en las ecuaciones *de tipo Boussinesq*. Estas son ecuaciones diferenciales parciales no lineales, que, al contrario que las de aguas someras, incluyen la dispersión frecuencial (olas de distintas longitudes de onda viajan a diferentes velocidades de fase). Las ecuaciones de Boussinesq son esencialmente las de aguas someras corregidas para incluir la aceleración vertical, dado que hasta que las partículas llegan a dichas profundidades, no se puede considerar que posean un movimiento puramente horizontal. Su uso radica en la propagación del oleaje en la región desde aguas profundas hasta someras, pues dicho estado transicional en aguas intermedias no se puede describir con la teoría lineal. En estos modelos, la componente horizontal de velocidad se asume constante en la columna de agua mientras que la vertical varía casi linealmente con la profundidad. Las ecuaciones de Boussinesq propiamente dichas nacieron en el año 1872 pero han evolucionado y se han mejorado en varios aspectos, como pueden ser la consideración de la variabilidad batimétrica, rotura del oleaje, tensión superficial, mejorando la frecuencia de dispersión y el comportamiento no lineal, o siendo utilizadas en diferentes capas del fluido aisladamente.

Los modelos que se basan en las ecuaciones elípticas *de pendiente suave* son aquellos que se utilizan para un bajo gradiente de profundidad, como su propio nombre indica. Son modelos muy apropiados para caracterizar la agitación en puertos, considerando batimetrías complejas. Consideran, en un dominio numérico bidimensional, los procesos lineales de refracción, difracción, reflexión... Originalmente conllevaban limitaciones en su uso debido a la poca pendiente, así como que su ecuación no contempla la disipación de energía del flujo o su restricción a oleaje lineal, pero recientemente han surgido avances para mejorar estos aspectos. Hoy en día se pueden encontrar ecuaciones en varias formas que incluyen dichos efectos de disipación, rotura, no linealidad, interacción oleaje-corriente o fricción del fondo.

Para finalizar, mencionar que existen diversidad de modelos que han sido desarrollados para tratar la representación precisa de la *turbulencia*, una problemática inherente a muchas aplicaciones ingenieriles. Este es un gran reto para el que no existe un modelo matemático universal válido.

Seguidamente se expone una tabla extraída de la publicación "*Application of numerical models and codes*", escrita por Thomas Vyzikas, que muestra la idoneidad de los diversos tipos de modelos de oleaje introducidos anteriormente para la simulación de diferentes tipos de procesos físicos.

Physical process Numerical models	Formulation/ Numerical Methods	Wave Diffraction	Wave Refraction	Wave Dispersion	Wave Non- linearity	Wave Breaking	Wave Run-up	Over- topping	Turbulence	Wave- Structure Interaction	Wave- Current Interaction
Navier-Stokes (CFD)	FVM or FEM FDM SPH	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	**** **** *** ⁽¹⁾ ****	**** **** ****
Hydrostatic	FDM or FVM	****	****		**				***		** ⁽²⁾
Potential flow	BEM FEM FDM	**** **** ****	**** **** ****	**** **** ****	*** *** ***	*** ^(3a) (^(3c)) (^(3d))	*** *** ***	* *		*** ^(3b) *** **	
Shallow Water Equations	FDM or FEM	****	****		***	**	***	* ⁺	* ⁺	* ⁺	** ⁽⁴⁾
Boussinesq	Standard High-order	**** ****	**** ****	** ***	*** ⁺ ***	*** ⁺ ***	*** ***	* ⁺ * ⁺	* ⁺ * ⁺	* ⁺ * ⁺	** ** ⁽⁵⁾
Mild Slope Equations	Elliptic (^(6a)) Hyperbolic (^(6b)) Parabolic (^(6c))	**** **** ***	**** **** **	**** **** *** ⁺	* * *	* * *			+ + +	* ⁺ * ⁺ +	** ** *
Spectral	Wave Energy Wave Action	+ +	**** ****	**** ****	** **	** *** ⁺			** **		***

Comments: ⁽¹⁾ Cut-cell, Virtual Boundary Force, or their kinds used; ⁽²⁾ Mainly for current simulation only and solved in the σ -coordinate; ^(3a) For initiation of wave breaking only; ^(3b) For large structures only; ^(3c) Adaptive mesh or σ -coordinate; ^(3d) σ -coordinate; ⁽⁴⁾ Current module only in a coupled model; ⁽⁵⁾ For coupled wave-current simulation; ^(6a) For steady wave field only; ^(6b) For transient wave field; ^(6c) Waves with primary propagation direction.

Notes: 1) The number of stars represents the level of suitability of a particular model for the corresponding wave phenomenon; + represents half star.
**** highly suitable; *** moderate suitability; ** poorly suitable; * not suitable; no star indicates incapability of the model to replicate the physical process.

Tabla 6: Competencias de los principales tipos de modelos numéricos. VYZIKAS, T. [et al.]. 2014

3.2.3. Modelo numérico seleccionado: CELERIS.

Expuestas las capacidades de los principales modelos numéricos se concluye que los que cubren las necesidades del presente TFG son aquellos que se basan en las ecuaciones del tipo Boussinesq. Como se puede apreciar en la tabla anteriormente referenciada, estos modelos cubren una amplia gama de procesos físicos, siendo de especial relevancia para describir los eventos de inundación el run-up, rotura de ola y rebase.

Entre el extenso inventario de programas de este tipo se ha seleccionado el modelo numérico Celeris, desarrollado por Sasan Tavakkol, estudiante de doctorado en la universidad de Southern California. Este código, escrito en C++ y HLSL de Microsoft, es open-source completamente gratuito y resuelve las ecuaciones de Boussinesq extendidas. Para ello usa un método híbrido de discretización, volúmenes y diferencias finitas, que permite contornos de costa móviles. Celeris es el primer software de simulación y visualización interactivo. Estas se realizan utilizando bibliotecas Direct3D de la GPU en vez de la CPU, habilitando una mayor velocidad que a tiempo real. De hecho, su amplia variedad de opciones de visualización e interacción es uno de sus puntos fuertes. Es la primera plataforma de modelaje interactivo para aplicaciones costeras como evolución de tsunamis o inundaciones, o modelaje de vientos cercanos a la costa. Celeris ha sido validado comparando sus resultados con multitud de puntos de referencia tanto para olas en rotura como no.

Para entender más en profundidad Celeris, debemos afondar en la naturaleza del problema: la resolución de las ecuaciones del tipo Boussinesq por medio de los programas existentes hasta el momento era inviable a tiempo real, así como la interactividad con el modelo o su visualización simultánea. Para alcanzar dicha simulación a tiempo real se necesitan hasta cientos de núcleos CPU y sin embargo Celeris tiene la capacidad de conseguir un modelaje y visualización más rápido en el ordenador de un usuario medio. Esto se consigue mediante la implementación

de unidades de procesamiento gráfico (GPU) para resolver dichas ecuaciones y mostrar los resultados en la interfaz de usuario (GUI) desde la que además, se puede interactuar a voluntad mientras se ejecuta el modelo. El autor saca ventaja de la combinación mediante GPU's y el lenguaje HLSL para lograr una mayor celeridad y proporcionar robustez al modelo. Sin embargo, puesto que no es el objetivo del presente trabajo el profundizar en avanzados conceptos informáticos, se referencia a la publicación del autor para una mayor comprensión de su funcionamiento.

En definitiva, el siguiente figura se esquematiza el procedimiento que sigue el software:

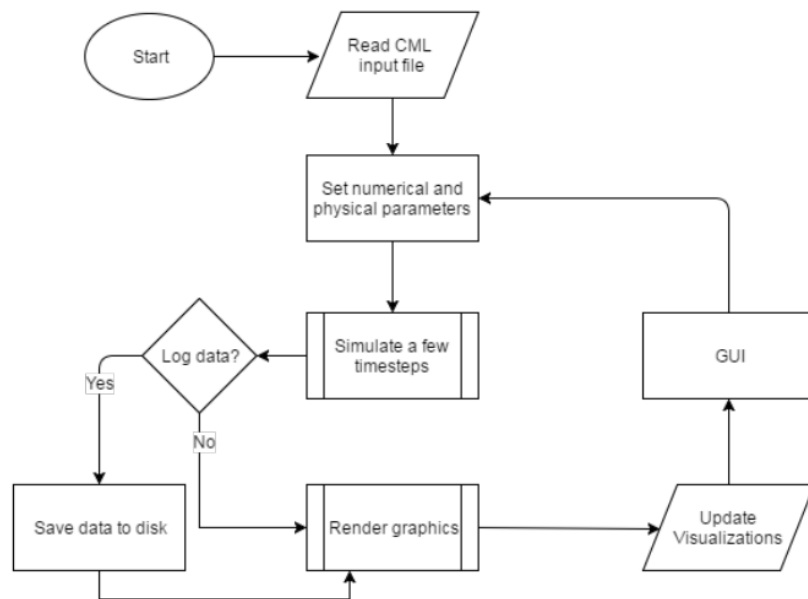


Fig. 26: Flujo de trabajo simplificado de Celeris.

Como se puede observar, todo comienza con la lectura de un archivo al que se le da la extensión .cml para distinguirlo de un archivo genérico del tipo .xml (eXtensible Markup Language) pero que, en definitiva, es lo mismo. Este archivo puede ser modificado con cualquier procesador de textos. En él se incluyen aspectos tan relevantes como las condiciones de contorno, la finura de la malla, los incrementos de tiempo de la simulación, la toma de datos, el parámetros físicos del oleaje u otras condiciones, así como la referencia a la batimetría, que se ha de encontrar en un archivo .cbf.

Todo esto se refleja en la interfaz del usuario, que representa un ambiente 3D en el que puede manejar la cámara y cambiar todos los tipos de parámetros anteriormente explicados a tiempo real, así como pausar o reanudar el experimento. Como se explicaba, Celeris proporciona un amplio abanico de opciones de visualización y escala tanto para el relieve como para el agua, representando su elevación, direcciones y magnitud de la velocidad o vorticidad.

3.2.4. Estrategia numérica planteada.

Introducido el modelo numérico a emplear se presenta ahora la estrategia a seguir.

Para empezar es necesario un archivo que contenga las coordenadas del conjunto de puntos de la zona a estudiar. Este ha sido gentilmente proporcionado por el IHCantabria y contiene tanto datos batimétricos como del relieve de la franja del litoral.

El dominio de este archivo debe ser lo suficientemente amplio como para contener todos los procesos de propagación que afectan al fenómeno. Sin embargo, a mayor superficie mayor será el coste computacional por lo que hay que encontrar un equilibrio adecuado.

El archivo, proporcionado en coordenadas UTM y con la extensión .dat, ha de convertirse al formato .cbf anteriormente explicado para su lectura con Celeris. Para ello se ha utilizado el programa *Bati2CELERIS.m* de Matlab, cuyo código puede encontrarse en el apéndice. Este permite definir una malla [i,j] con una determinada precisión y referir así a esta las coordenadas UTM proporcionadas. Además, es en este momento en el que se definen los puntos de toma de datos. A continuación se muestra una imagen de la batimetría de San Andrés definida en coordenadas UTM y su análogo en la malla definida con el programa. Cabe mencionar que en la franja costera se encuentra un pico en el relieve que ha sido truncado a 30 m para una mejor apreciación en la escala de colores de lo realmente importante, la batimetría. Por último, ha sido necesario definir con mayor detalle la franja de edificaciones más próximas a la costa, pues en otro caso la simulación no sería suficientemente representativa.

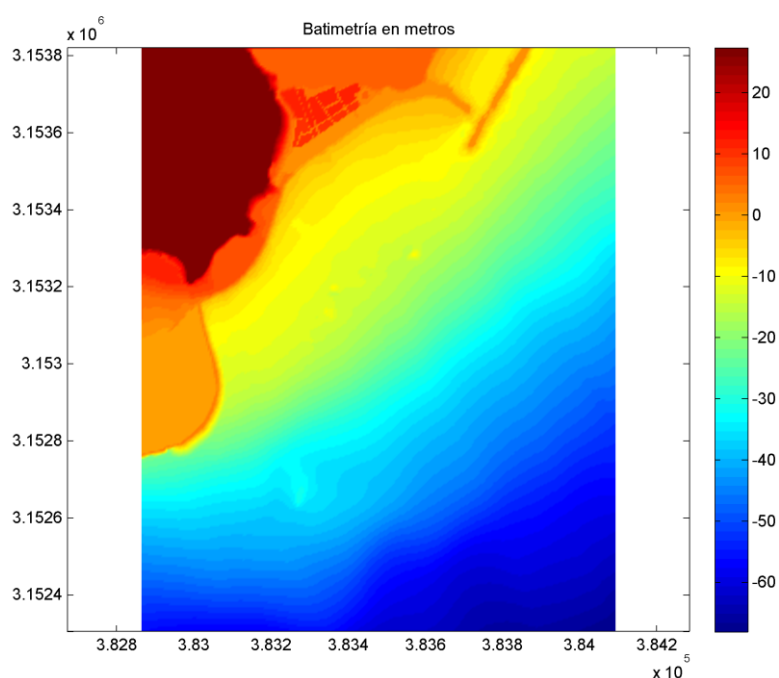


Fig. 27: Coordenadas UTM de la costa de San Andrés.

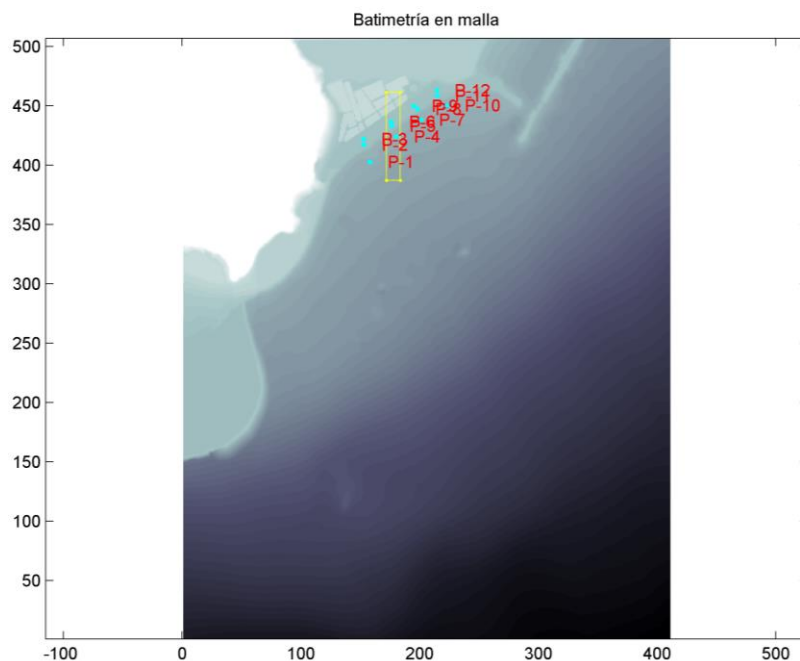


Fig. 28: Malla y puntos de toma de datos definidos para el estudio.

	E	N
P1	383338.16	3153513.82
P2	383322.57	3153556.29
P3	383321.66	3153570.93
P4	383404.43	3153577.94
P5	383392.88	3153604.17
P6	383392.47	3153615.14
P7	383467.87	3153620.14
P8	383457.89	3153646.88
P9	383448.52	3153654.81
P10	383532.84	3153655.75
P11	383508.41	3153680.54
P12	383506.44	3153694.15

Tabla 7: Coordenadas UTM de los puntos de muestreo definidos.

Como se puede observar en la imagen superior se dispone de 12 puntos de muestreo, desde las aguas someras (P1,P4,P7,P10), pasando por el extremo peatonal de la avenida (P2,P5,P8,P11) y finalmente la avenida (P3, P6, P9, P12). Se recoge así la franja perteneciente al núcleo urbano con 4 perfiles a lo largo de la misma.

Por otra parte necesitamos programar el archivo .cml.

Aunque el código se encontrará en el apéndice se explican en esta sección los puntos básicos a definir:

- Ajustes del modelo. Como el intervalo de tiempo de cálculo o el tipo de ecuaciones a resolver. Permite el uso de las de aguas someras o del tipo Boussinesq, siendo estas las más adecuadas por lo comentado anteriormente.
- Los ajustes del dominio de la solución, esto es, la superficie y sus tamaños de la rejilla. De no coincidir con los del archivo .cbf, Celeris calcula una interpolación entre ambos. Se ha de insertar el path hasta el archivo .cbf previamente obtenido.
- Configuración del almacenamiento de resultados. Puntos, superficies, cada cuánto tiempo guardarlos... etc.
- Ajustes del diseño gráfico del modelo.
- Las condiciones para los contornos del modelo (N,S,E,W). Pueden ser de tipo reflectivo, disipativo, con oleaje regular o irregular, definiendo las propiedades concretas de cada uno. En el presente caso será necesario provocar un oleaje irregular.

Precisamente con el objetivo de generar el forzamiento espectral de CELERIS, se hace uso de un segundo programa de Matlab: *Genera_espectros Irr_CELERIS.m*. En el se introducen los parámetros de altura significativa, período de pico y dirección, devolviendo el espectro completo, el cual es recompuesto a través del modelo espectral teórico de tipo escalar JONSWAP. Es necesario definir su parámetro γ (franja de tiempo que concentra la mayor frecuencia del oleaje- factor de ensanchamiento de pico). La función de dispersión direccional utilizada es coseno. Se obtiene como resultado un archivo de texto que recoge amplitud, período, dirección y fase de cada onda. Para un mayor detalle consultar el código anejo.

Puesto que, como todo modelo, este es una aproximación a la realidad, es necesario plantear ciertas hipótesis para su ejecución, ya sea por simplificar cálculos que de otro modo serían computacionalmente costosos o por falta de información. Entre estas hipótesis se encuentran, por ejemplo, un factor de ensanchamiento de pico de 3.3 (variando entre 1 y 7, el JONSWAP medio asume 3.3), el empleo de ecuaciones tipo Boussinesq, y condiciones de borde de la malla. Dada la orientación de la malla, los bordes norte y oeste permanecen siempre con tipo disipativo (llamado esponja). En ellos, se sacrifica un cierto número de celdas que actúan amortiguando el oleaje, como si de mar abierto se tratase. Esto evita que sigan ocurriendo ciertos fenómenos que afecten falsamente al modelo. En el presente caso se ha probado hasta que no se apreciase reflexión en los mismos, siendo necesarias 5 celdas de ancho. En los bordes sur y este se provocaba el oleaje irregular anteriormente descrito, dependiendo de su dirección se activaba uno y se establecía como disipativo el otro. Por otra parte, establece un tamaño de celda de 3 m x 3 m y una superficie del modelo de 1230 m x 1215 m puesto que, como se ha explicado previamente, no se reproducen fenómenos intracelulares, y dichos tamaños son adecuados para considerar los diferentes procesos con un rendimiento computacional decente. Una hipótesis arriesgada para compensar una resolución que debería ser mayor es que se ha establecido un coeficiente de Manning despreciable, estableciendo así la solución más desfavorable numéricamente, que permite asegurar la adecuada reproducción de los eventos de rebase. De todos modos el programa solo permite establecer el mismo para toda la superficie, hecho que no capta bien la realidad. Finalmente mencionar que el estado de mar analizado para conseguir unas condiciones estacionarias de energía es de al menos una hora para cada simulación.

Es necesario un último programa que permita el postproceso, es decir, la toma de datos. Para ello se utiliza [ReadGauges_CELERIS.m](#). En resumidas cuentas, se encarga de leer, cada intervalo de tiempo definido previamente, los parámetros indicados en los puntos definidos, concretamente la superficie del agua. Nótese que para los puntos que se encuentran sobre el terreno se indica originalmente su cota y cuando este es alcanzado por el agua se refleja su altura. Aunque no se debe de tomar esta como un resultado exacto numéricamente, si que permite comprobar que se produce el rebase en esa zona. Además de guardarlos en un archivo de texto se encarga de su representación gráfica.

3.3. Funcionamiento de la costa de San Andrés ante eventos de inundación.

A continuación se analizan, mediante el software descrito, los efectos producidos por los eventos de inundación, agrupados bajo las 2 grandes familias de oleaje que se han indicado en la sección 2.4. El objetivo sería pues corroborar que en efecto, se producen rebases en dichas situaciones y entender el modo en el que ocurren para plantear un diseño correcto de una estructura de mitigación del oleaje. Las gráficas en función del tiempo, para un estado de mar de 1 hora, se pueden consultar en el Apéndice VI.

Para comenzar este diagnóstico se considera la familia A de oleaje. Se recuerda que esta incluye aquellos eventos cuyo oleaje SWELL tenía componentes sur importantes y elevados periodos de pico.

Primeramente, con el caso correspondiente al fenómeno de Agosto de 2011, el más importante hasta la fecha en términos de daños y repercusión mediática. Sus características concretas empleadas para la reproducción en el modelo son las ya recopiladas en la tabla 4:

- Altura de ola significativa: 1.23 m
- Período: 17 s
- Dirección: 165º
- Nivel del mar: 2.63 m

Tras establecer dichas condiciones y ejecutar Celeris se observa como sí se producen rebases incluso hasta la entrada de las calles, lo cual significa que realmente irrumpiría en el pueblo, a pesar de no llegar a ser modelado tan precisamente (ver fig. 23). De hecho, es el único caso en el que se llegan a activar los 12 puntos considerados para medir la elevación en los mismos. Esto se refleja explícitamente en las gráficas siguientes a lo largo del tiempo.

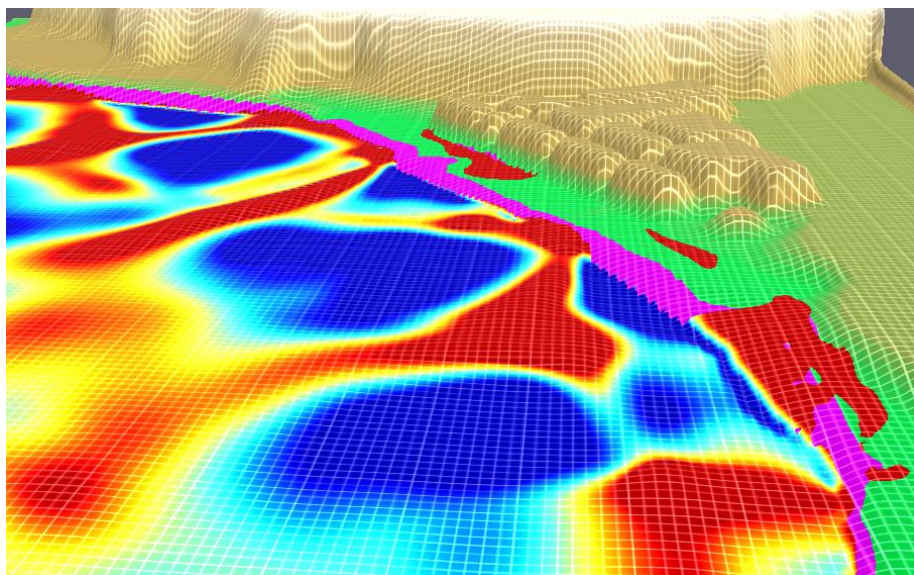


Fig. 29: Pantallazo de la simulación de Agosto de 2011. Inundaciones en violeta.

La batimetría de San Andrés, muy regular y cuyas profundidades siguen la forma de la bahía, no provoca un cambio de dirección notable debido a la refracción en este caso en el que el oleaje se dirige prácticamente desde el sur. Las ondas que curvan exteriormente hacia la Dársena Pesquera y la Cofradía de Pescadores son parcialmente reflejadas, pero sin lugar a duda lo

relevante es su prolongación a lo largo del litoral. Especialmente por la zona de la base de la montaña truncada previamente, siguiendo ese extremo oeste hasta que se concentra enfrente del núcleo urbano. El oleaje provoca ahí una sobreelevación de la superficie del mar. Esta puede ser debida a que la pendiente del lecho marino es suave y las corrientes de fondo son insuficientes para evacuar ese incremento. Finalmente, el oleaje que incide directamente proveniente del sur se combina con ello para rebosar hacia la avenida.

Un segundo evento de esa misma familia se da en diciembre de 2010:

- Altura de ola significativa: 0.9 m
- Período: 14 s
- Dirección: 180°
- Nivel del mar: 2.18 m

En diciembre de 2010, una situación similar a la de agosto de 2011, se observa inundación muy evidente, siendo esta vez decisiva la dirección. Comenzando con un asomeramiento al lado de la dársena, esta vez la propagación longitudinal de oeste a este es más fuerte, dada la incidencia puramente sur. El oleaje se disipa intensamente al llegar al extremo opuesto, interactuando con la escollera de la Cofradía de Pescadores y la semisumergida, entrando por la bocana hacia la playa con una difracción que ya no es relevante. Este evento provoca inundaciones más concentradas en el núcleo urbano, en el centro (P9 y P12, que corresponden al este-interior de la avenida, no detectan rebases). Aun así se concluye que este evento ha sido particularmente efectivo.

Por último dentro de esta familia A, existen dos eventos menos intensos, que no tienen concurrencia con la carrera de marea máxima, y además la altura de ola significativa no es especialmente destacable. Los periodos característicos de esta familia permitieron producir rebases en enero de 1999 y junio de 2012.

El caso correspondiente a enero de 1999 se ejecuta con las siguientes características:

- Altura de ola significativa: 0.59 m
- Período: 14.7 s
- Dirección: 140°
- Nivel del mar: 2.30 m

A efectos de rebase este evento es claramente menos importante que el resto de los acaecidos, posiblemente por su escasa altura de ola significativa. Sus consecuencias se reducen al centro del núcleo urbano de San Andrés, que se puede percibir mediante la ligera actividad registrada en P8.

Y finalmente el evento ocurrido en junio de 2012:

- Altura de ola significativa: 0.81 m
- Período: 12 s
- Dirección: 125°
- Nivel del mar: 1.81 m

Siendo muy semejante al anterior, aunque con un pequeño decremento en sus características, vuelve a registrar ciertos roces en el P8. Es sin duda el evento más débil de todos los expuestos, que al menos sirve para constatar que el software no es extremadamente sensible

al run-up tal como se ha definido. En esta ejecución, el oleaje incidente sobre el talud de la carretera que circula a los pies de la montaña se refleja y reparte quedando, por un lado, disipado en la esquina con la Dársena Pesquera, y por otro, creando una débil corriente longitudinal. La propagación es relativamente directa hacia el frente de la bahía.

Del mismo modo se ejecuta un análisis para la familia B de oleajes, con direcciones cuyo rango oscila entre los 90º y 140º y cuya limitación del fetch por longitud no permite períodos superiores a 13 s.

Un primer evento a analizar tiene lugar en julio de 2007 con:

- Altura de ola significativa: 1.04 m
- Período: 10.9 s
- Dirección: 110º
- Nivel del mar: 1.95 m

En este caso, los rebases no se simulan tan claramente llegando a invadir la avenida, pero varios sensores detectan anegamiento de la acera peatonal (P5, P8 y P11). Si fuese necesario traducir este evento a la realidad, posiblemente significase, cuando menos, choques del oleaje contra el muro rociando la calle. Sin embargo, gracias a las noticias encontradas, consta que los efectos han sido peores, llegando a inundar comercios de la primera línea de costa.

Como se puede intuir, este es un escenario mucho menos crítico que el anterior. El oleaje, más débil, no puede propagarse longitudinalmente desde el extremo oeste dada su dirección. Se refleja en la zona de la montaña, lo cual disipa y rebaja el oleaje incidente. Se difracta ligeramente con la escollera semisumergida y, además, la refracción provoca la tendencia al giro hacia la derecha, es decir, a orientarse según la batimetría.

Por otra parte tenemos un segundo evento de esa familia acaecido en febrero de 2012 con:

- Altura de ola significativa: 1.97 m
- Período: 7 s
- Dirección: 98º
- Nivel del mar: 2.39 m

Se detectan inundaciones en los puntos P5 y P8, correspondientes al extremo de la acera peatonal. En este caso el ángulo de incidencia y el escaso período no permiten acumular tanta energía en el oleaje pero en efecto, existen rebases. La respuesta producida es la misma que en el evento anterior, clara refracción en sentido horario, orientándose hacia la bahía, y refracción en la escollera enfrente de la playa de las Teresitas.

En junio de 2014 con:

- Altura de ola significativa: 1.14 m
- Período: 13 s
- Dirección: 130º
- Nivel del mar: 1.93 m

Como cabría esperar, este evento produce un comportamiento en la costa de San Andrés que es una combinación de los oleajes anteriores, que procedían más puramente del sur o el este. Así, las corrientes longitudinales del este que se provocaban en la base de la dársena y la montaña son ahora más débiles. Del otro extremo, la escollera semisumergida provoca una leve difracción que ayuda en el movimiento en el otro sentido. Todo ello, en conjunto con el oleaje que incide directamente a esos 130º asomerándose notablemente provoca algún evento de rebase. Se suceden inundaciones P5, P8, P11 e incluso algún roción en P6.

Si bien no todos los casos han desencadenado un rebase claro del oleaje, en ellos se observa como el run-up podría generar roturas de ola y rociones en la zona externa del paseo marítimo, dependiendo ya de la configuración de la escollera y el muro. Sin embargo, estas no son características que se puedan simular numéricamente, y menos limitándose a una rejilla de 3x3 m, obteniendo las coordenadas de un MDE de 5x5 m.

En lo que a la familia A respecta, es de especial interés el evento de agosto de 2011, ya que es un ejemplo que describe muy bien el comportamiento del grupo. Es especialmente destacable no solo dada su devastadora repercusión real, si no también a efectos del modelo, pues es el ejemplo más claro en el que el oleaje irrumpe en la avenida, como se ha podido observar. Con esto, se confirman los factores mencionados en la sección 2.2. En la simulación a tiempo real se aprecian claramente los desplazamientos longitudinales a lo largo del litoral de San Andrés. Estos comienzan al incidir en la dársena pesquera al Oeste, recorriendo el margen de la bahía e incrementando su fuerza dado el asomeramiento hasta que finalmente llegan al frente del núcleo de la población. Es ahí donde el oleaje que incide directamente se apoya en esta sobreelevación del nivel del mar para rebasar a la avenida. De hecho, se observa que cuanto mayor es la componente sur, más relevancia tiene la propagación longitudinal desde la Dársena Pesquera hasta el extremo este de la bahía, perdiendo fuerza en el sentido opuesto. Es por ello que el oleaje proveniente del sur tiene una gran repercusión en estos episodios.

Por otra parte, se ha constatado como aquellos estados de mar correspondientes a la familia B, es decir, más relacionados con el este, tienen una menor transcendencia en lo que a rebases corresponde. Esto puede ser debido al bloqueo parcial por parte del dique semisumergido de la playa de las Teresitas. O bien la inexistencia del efecto previamente comentado de agrupamiento del oleaje longitudinal en el punto medio del litoral. En esta serie de casos el oleaje se difracta en el dique semisumergido, disipando gran parte de la energía. Del otro extremo, el oleaje es reflejado y bloqueado en la Dársena Pesquera y la base de la montaña, encontrándose muy bien protegidas con escollera en los taludes de la carretera que discurre a sus pies.

3.4. Conclusión.

En el presente capítulo se ha expuesto una tipología general de modelos numéricos, junto a sus ventajas y desventajas, y se ha determinado cual sería el más apropiado a utilizar en el presente estudio.

Por medio del software Celeris y las hipótesis y condiciones de contorno empleadas se han replicado satisfactoriamente los eventos de inundación que asolaron el pueblo de San Andrés en los últimos años.

Ello ha permitido analizar la respuesta que ejerce la batimetría y forma del litoral en la propagación del oleaje y se pueden destacar los siguientes puntos:

La presencia del dique de escollera al frente de las Teresitas ayuda no solamente a amortiguar el oleaje incidente sobre la playa si no también aquellos procedentes del este hacia San Andrés, los referidos como familia B, destacando el efecto de difracción que produce en la bocana oeste. Este tipo de oleajes se refractan adquiriendo el sentido de avance perpendicular a las curvas de nivel, es decir, girando en sentido horario hacia el núcleo del pueblo. Sin embargo, del otro extremo de la bahía, el oleaje se disipa notablemente en la base de la montaña y no genera gran repercusión.

No es el caso de los oleajes que proceden con una componente sur más acentuada, agrupados bajo la familia A. Estos se apoyan en los taludes de la Dársena Pesquera y la carretera que circula en la base de la montaña para generar un movimiento longitudinal a lo largo de la bahía hacia el este. Junto a aquel que hace lo propio del extremo oeste, en curva de la Cofradía de Pescadores y el que incide directamente se generan los rebases en el frente del núcleo de la población.

En cuanto al período, es necesario que este tenga una duración elevada para que se encadenen los efectos de las olas y consiga energía. Las gráficas en función del tiempo de los periodos pico muestran como debían superar los 12 s para generar un evento relevante, llegando a sobrepasar los 14 s. Esto favorece a la familia A en intensidad, con periodos entre 10 y 16 s más típico de los oleajes tipo SWELL, alejándose de los tipo sea, como también se ha comentado en la sección 2.2. Estos se desarrollan y diferencian a lo largo del meridiano S-N llegando a la costa ordenadamente y con gran energía.

Del mismo modo ocurre con la altura de ola, si bien es cierto que el nivel del mar es el factor más relevante, los eventos de rebase no ocurrirán claramente si no se supera una determinada altura de oleaje, en torno al metro de altura. Prueba de ello son los eventos de enero de 1999 y junio de 2012.

Para concluir, incidir una última vez en la relevancia de la marea astronómica en los eventos acaecidos, nexos entre todos ellos y punto origen de la investigación.

4. DISEÑO DE UNA PROTECCIÓN COSTERA.

4.1. Planteamiento.

En base al análisis del funcionamiento de la costa de San Andrés ante los distintos tipos de oleajes que han provocado eventos de inundación se plantea en el presente capítulo el diseño de una construcción marítima que solucione el problema.

Como primera aproximación se sugiere que esta sea del tipo de dique en talud. Este tipo de construcción, sencilla pero robusta, es a la vez económica comparada con diques verticales. Entre sus ventajas se encuentran:

- Validez para prácticamente todo tipo de cimientos.
- Buena disponibilidad de medios.
- Fácil de construir en ambientes agrestes, como la zona de rompientes.
- La energía entrante es parcialmente disipada.
- Buen comportamiento ante olas rompientes.
- Daño de la estructura progresivo por lo general.
- Reparación relativamente sencilla.

Por otra parte ha de tenerse en cuenta que sus taludes no afectarán a ningún tipo de canal de navegación, y que no se debe diseñar para grandes profundidades pues si no la cantidad de material (y por tanto coste) sería excesiva.

El emplazamiento de dicho dique queda muy limitada por la localización núcleo urbano, que es en definitiva el objetivo a proteger.

Tras un enfoque más superficial mediante varios diseños elementales se exponen a continuación tres diseños preliminares de alternativas en planta. Estas se describen atendiendo en primer lugar al aspecto funcional, puestas a prueba frente a las dos familias de oleaje descritas en capítulos anteriores. Para ello se ha empleado nuevamente el software Celeris y se ha asignado una altura arbitraria de +5 m sobre la BMVE para las tres opciones. Posteriormente se analizarán según más criterios.

4.1.1. Alternativa 1.

En esta primera alternativa se propone la construcción de un dique de protección localizado en la costa oeste, contiguo a la carretera que se dispone a la base de la montaña. Este posee una curvatura hacia el exterior y alcanza los 300 m de longitud en su eje central. Si bien esta longitud puede ser modificada en mayor o menor medida, especialmente por el hecho de cubrir la zona más oriental, ante las abatidas del oleaje del este. Su profundidad máxima ronda los 5 m.

Como se puede apreciar, esta primera opción surge para dar la solución perfecta a oleajes de componente sur, pues corta radicalmente la propagación desde la Dársena Pesquera por el pie de la montaña. En añadidura, se ha diseñado un morro con el objetivo de producir difracción del oleaje que se pudiese propagar longitudinalmente por el dique, aprovechando esta energía para neutralizar la entrante por el este.

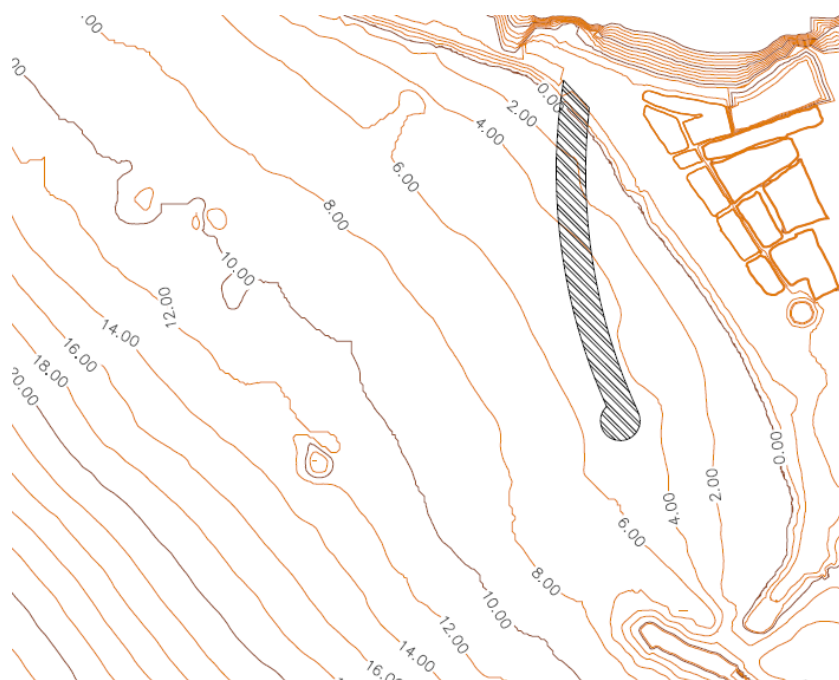


Fig. 30: Vista en planta de la Alternativa 1.

En cuanto a las ejecuciones en Celeris para ambas familias de oleaje se aprecia lo siguiente.

La familia A, como era de esperar, no presenta problemas para su disipación. Si bien es cierto que la zona en curva del cabo de la Cofradía de Pescadores se ve ligeramente afectado, es un problema que se podría solucionar fácilmente con escollera de mayor tamaño en esa zona o extendiendo más el dique en talud.

La familia B, con una incidencia mucho más directa hacia la bocana, es crítica. Si bien el dique semisumergido existente enfrente de la playa de Las Teresitas aporta protección al disipar y proteger el oleaje, también hay una importante agitación en el interior de la zona. El oleaje se refleja entre la costa y el dique en talud alcanzando puntos más cercanos al pueblo con cierta intensidad.

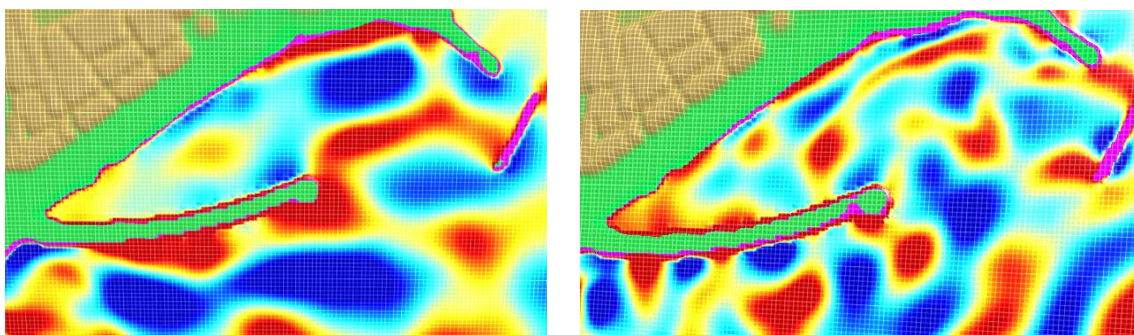


Fig. 31: Ejemplos visuales de oleajes sur y este en Celeris. Alternativa 1.

4.1.2. Alternativa 2.

En un intento de amortiguar también los oleajes del este, se propone en esta alternativa la construcción de dos diques de abrigo de menor longitud, partiendo uno de cada extremo del pueblo de San Andrés, como estructura más típica de un puerto.

El arco oeste posee 180 m de longitud y el este 75 m, alcanzando así una longitud total menor que en el caso de la alternativa 1 y en el mismo rango de batimetrías.

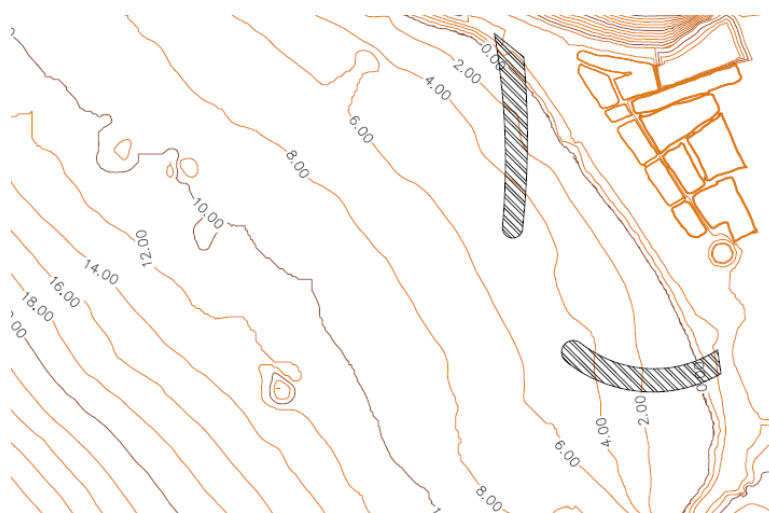


Fig. 32: Vista en planta de la Alternativa 2.

Con su ejecución en Celeris se ve sin embargo que dejar una apertura central no es una idea acertada ya que la propagación irrumpe con bastante fuerza.

En lo que a la familia A corresponde, esta contiene el oleaje, que circula longitudinalmente por el exterior de los diques. En la parte este genera problemas en su contacto con tierra firme, pues entre su intersección y el cabo se concentra la energía de las ondas, generando una sobreelevación que, si bien no afecta al núcleo urbano, sería preferible evitar. Más crítica es la situación que ocurre en el interior del abrigo, pues la agitación no se resuelve y crea un run-up importante.

La familia B por su parte, que procede del este, se refracta en sentido antihorario, entrando perpendicular a las curvas de nivel justo por la bocana. Su influencia es mayor en frente de la primera línea de viviendas.

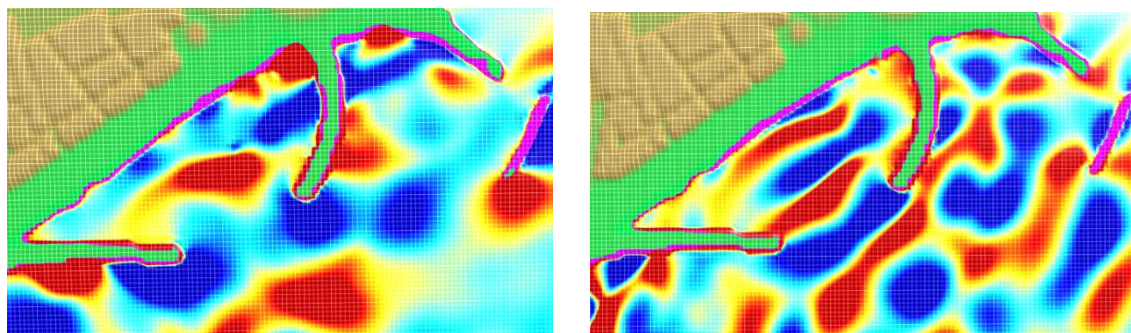


Fig. 33: Ejemplos visuales de oleajes sur y este en Celeris. Alternativa 2.

4.1.3. Alternativa 3.

Esta propuesta, mucho más simple que las anteriores, sigue la tónica de la escollera semisumergida existente enfrente de la playa. De este modo se crea una cierta continuidad en el paisaje, integrándola de una manera más suave en el litoral de San Andrés. La alternativa consiste en un dique exento en talud que se encuentra al frente del núcleo urbano, la zona que necesita más protección y para la cual se ha visto que los rebases son más intensos. El dique se encuentra entre las batimetrías -2 y -6 m y posee una longitud de 340 m con una ligera curvatura hacia mar adentro.

La presencia del dique crea una zona abrigada donde debido al proceso de difracción se consigue una disminución de las alturas de ola y una curvatura del ángulo del oleaje, que tiende a ser perpendicular en el trasdós del dique.

A falta de un diseño más detallado de ambos extremos, que por su posición más expuesta deben disminuir el talud, aumentar el peso o variar su sección para proporcionar estabilidad, a continuación se muestra un croquis de su geometría.

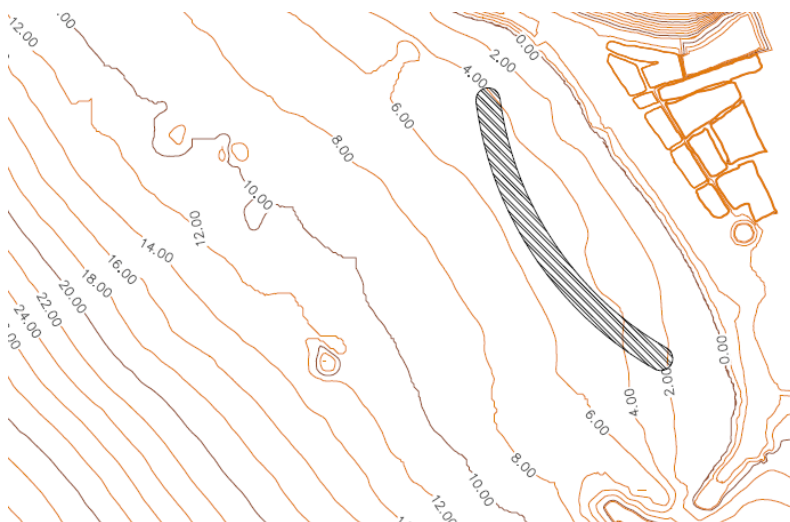


Fig. 34: Vista en planta de la Alternativa 3.

Las ejecuciones en Celeris muestran un comportamiento satisfactorio.

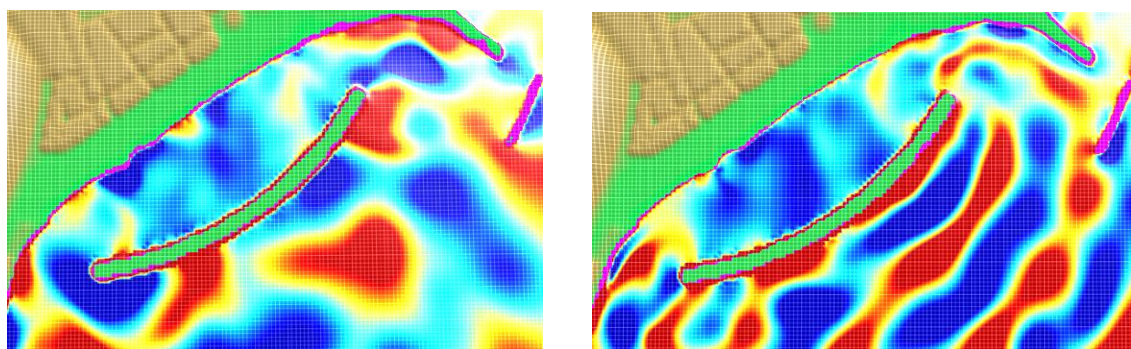


Fig. 35: Ejemplos visuales de familias A y B en Celeris. Alternativa 3.

En lo relativo a la familia A, como único inconveniente, se encuentra la propagación longitudinal generada en la Dársena Pesquera que viaja asomerándose entrando por la bocana oeste del dique diseñado o continuando por el borde exterior del mismo. En ambos casos, es probable que el modelo esté considerando una situación que en la realidad provoca mucha más disipación, al haber elementos que no se pueden diseñar con precisión como la escollera. Sea cual sea el caso, la altura de ola ya no es suficiente como para desencadenar rebases en el pueblo. Quizás debería ser necesario un refuerzo de la escollera en la curva del cabo hacia la Cofradía de Pescadores, ya que dicha zona se ve afectada por la difracción o giro del oleaje en el extremo del dique.

Nuevamente, la protección ante la familia B se ayuda del dique de Las Teresitas. El oleaje incidente en el dique es parcialmente disipado, reflejado y propagado longitudinalmente hasta ambos extremos. En ese punto, es difractado perdiendo energía considerablemente, además de disipado en la propia escollera que existe en el talud del paseo marítimo.

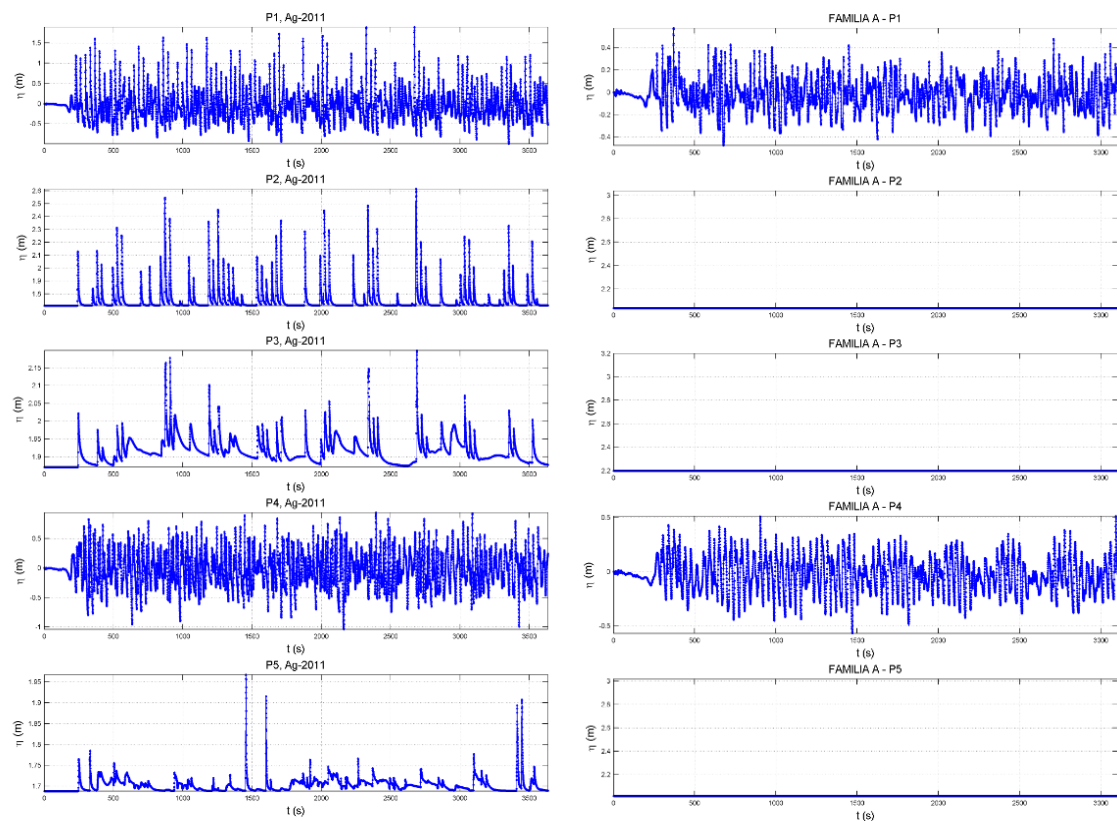


Fig. 36: Comparación de rebases antes y después de la alternativa (Apéndice VII)

Existen dos tipologías de diques exentos: los emergidos y los sumergidos o de baja cota de coronación, siendo estos últimos muy adecuados, ya que además de reducir el impacto visual de la obra, se consigue una mayor renovación de las aguas y una reducción en los costes de construcción, ya que necesitan menor cantidad de material al coronar a una cota menor y además las sollicitaciones del oleaje son menores.

Los diques sumergidos son diseñados como un filtro de olas, las alturas de ola menores consiguen atravesar el dique sin disminuir demasiado su energía, mientras que las olas con mayor altura rompen en la estructura perdiendo gran parte de ésta. Se ha demostrado que la erosión o acreción de sedimento están fuertemente ligadas a la altura de las olas, así por ejemplo, las olas de tormenta, que tienen un mayor altura, tienden a erosionar, mientras que las olas de baja energía, que son las de menor altura, tienden a acumular sedimento.

4.2. Justificación de la alternativa elegida.

En esta sección se valorarán cada una de las alternativas propuestas y a continuación se seleccionará la más adecuada. Para ello, se emplea el análisis multicriterio, un método que permite seleccionar una alternativa entre las distintas existentes en función del grado de cumplimiento de los distintos criterios de manera objetiva y sistemática. El análisis multicriterio se lleva a cabo en cuatro fases:

1. Definición del conjunto de alternativas.
2. Establecimiento de objetivos, criterios e indicadores.
3. Evaluación de cada alternativa en relación con cada criterio.
4. Agregación de las evaluaciones parciales previa definición de la importancia relativa de los distintos criterios.

4.2.1. Establecimiento de los criterios.

Se deben establecer una serie de criterios que permitan obtener una solución óptima de las tres alternativas propuestas. Los criterios que se han establecido son los siguientes:

a) Aspectos funcionales

Dentro de los aspectos funcionales se valoran varios criterios. En primer lugar y más importante, se tendrá en cuenta la disipación del oleaje que llega al frente urbano. Por otra parte, se podrían incluir elementos funcionales que beneficien a la sociedad.

b) Aspectos constructivos

Son los aspectos relativos a la ubicación de materiales y a la mayor o menor dificultad, rapidez y seguridad a la hora de realizar los trabajos de construcción. Además, tendrán una gran importancia los accesos terrestres y los marítimos.

c) Aspectos ambientales

Se tendrán en cuenta tanto los aspectos que afectan al medio físico y biótico como los que afectan al medio social y perceptual.

d) Aspectos económicos

Con este criterio se valora por un lado el coste total de la obra y por otro la repercusión económica que vaya a tener cada alternativa en la zona debida a la construcción y explotación.

4.2.2. Peso de los criterios.

Para poder valorar cada alternativa será necesario establecer una serie de pesos para cada criterio. En este caso, los pesos asignados son los siguientes:

- Criterio funcional: 0,30
- Criterio constructivo: 0,15
- Criterio medioambiental: 0,35
- Criterio económico: 0,20

Como se puede observar en la distribución de los pesos, se le da mayor importancia al criterio medioambiental, seguido de los aspectos funcionales y económicos con un mismo valor y seguido en último lugar por los criterios constructivos.

Se ha decidido dotar de mayor peso al criterio medioambiental ya que con el paso de los años, ha ido adquiriendo un papel cada vez más importante en las obras civiles. Además, en la actualidad un proyecto que no cumpla con unos requisitos medioambientales mínimos, no podrá llevarse a cabo por muy buenos que sean el resto de los criterios.

A continuación del criterio relativo al medio ambiente, se ha establecido el criterio funcional dada la gran necesidad del pueblo de San Andrés de conseguir evitar los eventos de rebase y reducir la situaciones de riesgo. Cuando se decide llevar a cabo la construcción de una obra de ingeniería civil, se deben cumplir los requisitos funcionales para los que ha sido diseñada ya que en caso contrario la obra carecería de sentido.

Le sigue el criterio económico. Es evidente que es mejor cuanto más barata sea una obra ya que los gastos iniciales podrán ser amortizados con anterioridad obteniendo beneficios en un menor tiempo desde la inversión inicial.

Se ha decidido colocar los criterios constructivos en último lugar ya que con los avances actuales, prácticamente cualquier proyecto puede ser realizado, aunque la complejidad técnica que se requiera sea muy elevada.

4.2.3. Valoración de las alternativas.

a) Aspectos funcionales.

Los diseños preseleccionados fueron analizados ante las 2 grandes familias de oleaje que se han descubierto en el presente estudio para la mención de Hidrología. Teniendo en cuenta las respuestas producidas y comentadas detalladamente en el apartado 4.1. se ve que la opción 3 es la más adecuada en este sentido, aunque ninguna genere rebases en el paseo marítimo. Las carencias de las alternativas 1 y 2 se pueden mejorar si incluyesen por ejemplo, la generación de una playa encajada, o habilitándolas para el fondeo de pequeñas embarcaciones. Por otra parte la agitación existente al abrigo de dichas estructuras es bastante elevada y sería necesario un rediseño. Además, estas dos alternativas permitirían habilitar, de manera relativamente sencilla, un paseo peatonal en su coronación.

Mención aparte merece la seguridad de las propuestas. En el hipotético caso de construir cualquiera de las 2 primeras, la conexión con tierra permite el paso a los más inconscientes a la coronación del dique a admirar eventos de temporal. Aunque parece que no hace falta decirlo, lo cierto es que son muchas las personas que cometen este tipo de errores, poniendo en peligro sus vidas. Esto fuerza también al ayuntamiento a tomar las medidas preventivas necesarias para restringir el acceso, desde barreras a agentes de la ley.

b) Criterio constructivo.

Los accesos correspondientes a las alternativas 1 y 2 serían terrestres. Del extremo oeste se produce directamente por la autovía TF-11, que circula por la base de la montaña y posee dos carriles en cada sentido, permitiendo mantener el tráfico con moderada fluidez. Por el oeste en cambio habría más interrupciones, ya que el transporte modifica la circulación dentro del pueblo. La actividad comenzaría en el dique de encerramiento de Las Teresitas donde se sitúa el restaurante Cofradía de Pescadores, un nuevo inconveniente. En cuanto a los acopios de material existen zonas libres en la Dársena Pesquera que podría ser solicitadas a la autoridad portuaria, así como una especie de hangar al lado de las Teresitas o detrás del aparcamiento.

Por su parte, la opción 3 necesitaría maquinaria marítima gran parte del tiempo y otro tipo de almacenamiento, así como la construcción de un cargadero para gánguiles. Para el núcleo, se podrían alcanzar profundidades de -2 m utilizando gánguiles, mientras que grandes bloques ya requerirían el uso de pontonas con grúas Derrick. La ventaja constructiva es más bien para el ciudadano de San Andrés, que no ve alterado el tráfico.

Entre las ventajas de la obra terrestre frente a la marítima son:

- Ofrece menos turbidez y mayor facilidad de control de obra.
- Provoca menos dispersión del material.
- La vía marítima no compacta el núcleo.
- Las anchuras de coronación por vía terrestre pueden ser mayores.
- La obra se expone menos a la acción de temporales (solamente el frente de avance), siendo más fácil de proteger.

De acuerdo a esta preferencia se podría considerar el hecho de avanzar la construcción desde tierra, retirando a posteriori el tramo de conexión inicial.

c) Aspectos ambientales.

Las 3 alternativas requieren de un estudio detallado de impacto ambiental a adjuntar en el proyecto de construcción. Aunque posean principalmente características similares existe un factor que inclina la balanza hacia la tercera: la renovación de aguas. Mientras que las dos primeras opciones poseen una disposición en planta que retiene el oleaje en su abrigo la tercera modificaría en menor medida el comportamiento del oleaje, al permitir la propagación longitudinal e incluso atravesarlo si se trata de un dique de baja cota de coronación. Estas corrientes permiten la renovación aguas beneficiando la vida acuática con una mayor oxigenación, nutrientes, vías de paso... Para una mayor comprensión de las consecuencias se recomienda dirigirse a la ROM 5.1, que explica con detalle análisis de calidad biológica y características físico-químicas del agua o sedimentos.

Un aspecto crucial que afecta al medio humano es el impacto visual. Tal y como se ha mencionado previamente, la tercera opción es la que mejor se integra visualmente en el paisaje, dado que ya existe una estructura similar en la playa.

Siguiendo esta línea se encuentra una gran inquietud de los habitantes de San Andrés según se recoge en testimonios de las noticias... Si se tiene en cuenta que la cota del paseo marítimo es de +4 m y la horizontal visual ronda los +5 m, se puede concluir que toda estructura que alcance dicho nivel ocultará el horizonte. Por lo tanto, se ha de procurar no superar una cota de aproximadamente +3 m en la solución definitiva.

d) Aspectos económicos.

Las 3 alternativas, lejos de ser ostentosas, han sido seleccionadas precisamente para proporcionar una solución rápida al pueblo de San Andrés. Su relativa sencillez constructiva permite así la reducción de costes.

Una marina deportiva, según se piensa, no sería justificable existiendo la Dársena Pesquera y las ya construidas en y de camino a Santa Cruz, en un tramo de costa menor de 10 km. Por otra parte, la incorporación de una playa además de alterar el medioambiente, se ve innecesaria dadas las dimensiones de Las Teresitas. Es probable que de todos modos, surgiese una playa natural de pequeño tamaño con cualquiera de las 3 opciones, cuya forma habría que analizar más detalladamente y que no es objeto del presente TFG.

En base a si la construcción se realiza por vía terrestre o marítima en el caso de la tercera alternativa, los costes variarían considerablemente, siendo esta última, más cara. Por otra parte es cierto que el transporte a pie de obra de grandes volúmenes de piedra no es barato.

Para obtener una estimación económica rápida de las susodichas alternativas iniciales se ha utilizado el programa Civil 3D. Se han generado superficies de talud 2:1 con cota de coronación correspondiente a 5 m y ancho de la misma de 22 m, y se han intersecado con la batimetría para hallar el volumen aproximado de material necesario. Cabe mencionar que estas no incluían el morro de la estructura ni ningún tipo de factor para la porosidad. Son simplemente por comparar de forma burda los volúmenes. He aquí los resultados:

Alternativa 1: 88345.86 m³

Alternativa 2: 45767.17 (W) + 38330.00 (E) = 84097.17 m³

Alternativa 3: 128271.09 m³

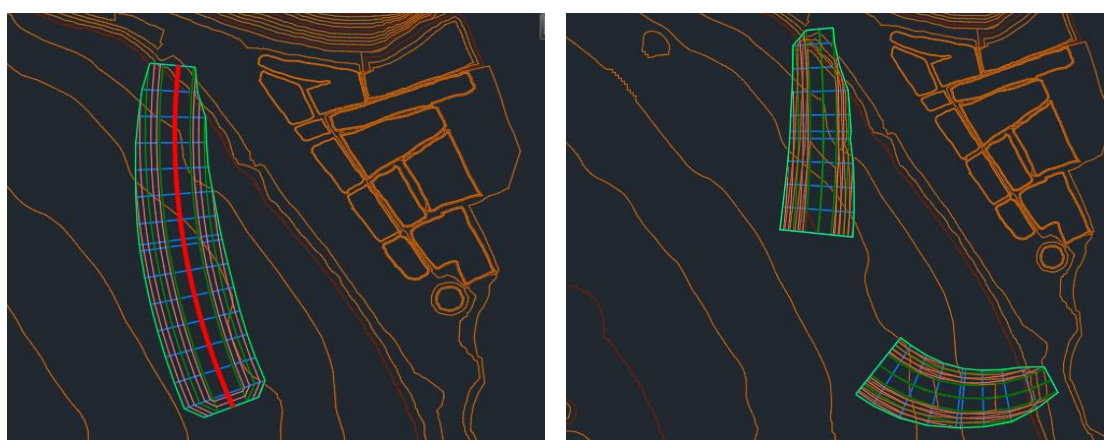


Fig. 37: Ejemplos de cálculo volumétrico a partir de dos superficies en Civil3D.

Se concluye pues que la tercera de las opciones sería notablemente superior en coste dada la cantidad de material y ejecución en caso de ser vía marítima.

Se obtiene así la siguiente matriz de evaluaciones parciales, cuyo rango de valores se dispone de 0 a 10.

	Funcionales	Constructivos	Ambientales	Económicos
Alternativa 1	8	8	7	10
Alternativa 2	7	7	6	10
Alternativa 3	10	6	10	6
Pesos	30%	15%	35%	20%

Tabla 8: Evaluaciones parciales de las 3 alternativas.

4.2.4. Agregación de las evaluaciones parciales.

Para ello se empleará el método de las medias ponderadas, que sigue la siguiente fórmula:

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^m Y_{ij} * P_j}{\sum_j P_j}$$

$$Y_1 = 8 * 0,30 + 8 * 0,15 + 7 * 0,35 + 10 * 0,20 = 8,05$$

$$Y_2 = 7 * 0,30 + 7 * 0,15 + 6 * 0,35 + 10 * 0,20 = 7,25$$

$$Y_3 = 10 * 0,30 + 6 * 0,15 + 10 * 0,35 + 6 * 0,20 = 8,6$$

Siguiendo ese esquema, se puede emplear también el método de la suma de rangos. Este las califica por orden de preferencia (desde 1 hasta las n alternativas) en cada uno de los ámbitos:

	Funcionales	Constructivos	Ambientales	Económicos
Alternativa 1	2	1	3	1
Alternativa 2	3	2	2	2
Alternativa 3	1	3	1	3
Pesos	30%	15%	35%	20%

$$Y_1 = 2 * 0,30 + 1 * 0,15 + 3 * 0,35 + 1 * 0,20 = 2$$

$$Y_2 = 3 * 0,30 + 2 * 0,15 + 2 * 0,35 + 2 * 0,20 = 2,3$$

$$Y_3 = 1 * 0,30 + 3 * 0,15 + 1 * 0,35 + 3 * 0,20 = 1,7$$

Por tanto se obtiene para ambos procedimientos la misma conclusión, la alternativa más ventajosa es la tercera, seguida de la primera y por último la segunda.

4.3. Mejoras a la alternativa seleccionada.

Llegados a este punto del proceso de diseño se considera necesaria una reestructuración de la tercera alternativa en los ámbitos económicos y constructivos, sus principales carencias.

El enfoque ha consistido en la reducción de la cota de coronación de +5 a +3 con una doble motivación:

- Se reduce considerablemente el volumen de material, estimándose esta vez en 92371.80 m³, sin ningún tipo de factor de porosidad como se comentaba previamente.
- Por otra parte se consigue evitar el impacto visual para el ciudadano, al localizarse por debajo de la horizontal de su vista, estimada en +5 m desde el paseo marítimo (y por supuesto para la primera línea de viviendas).

En base a ello, el criterio funcional ha sido contrastado por última vez con Celeris. La propagación del oleaje es muy similar a la ejecutada para la cota de +5 m. La principal diferencia es que esta vez, el oleaje rebasa el dique claramente. Sin embargo, este consigue amortiguar lo suficiente el oleaje incidente como para evitar que se combine con las ondas longitudinales a la costa para irrumpir en el paseo marítimo de San Andrés.

En el desenlace del Apéndice VI se adjuntan las gráficas en función del tiempo para justificar esta decisión.

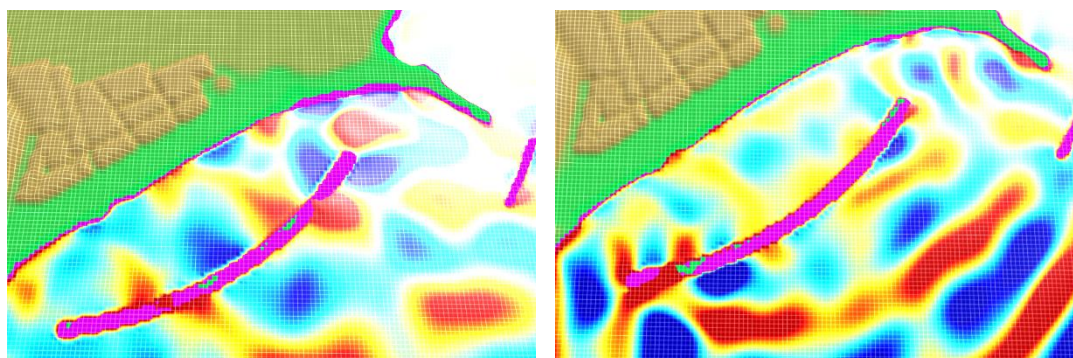


Fig. 38: Simulaciones de la solución final ante las familias A y B.

Por otra parte se ha de atender a la fase constructiva. Las ideas previamente mencionadas consistían en, o bien utilizar una vía marítima, o mediante un acceso provisional terrestre. Ambas poseen sus ventajas y desventajas.

La marítima, tiene los inconvenientes comentados en la sección 4.2.3. Entre sus ventajas, la sencilla conexión con la zona amplia de acopio en la dársena pesquera o el evitar la perturbación del tráfico.

La opción terrestre, bien fundamentada, podría suponer ventajas adicionales. Mediante un enlace en el extremo oeste, perpendicular a la costa y de relativamente corta longitud, se conseguiría frenar la propagación longitudinal. De este modo se evita una de las componentes que, junto con las ondas con las que son reflejadas en la otra bocana o rebasan puntualmente el dique, podrían ser determinantes en la irrupción a la avenida. Al finalizar la construcción, se debe retirar parte de dicha conexión para permitir la renovación de aguas. Esta es, de hecho, la opción que existe en la realidad desde 2015, y que ha sido diseñada por el director del presente TFG, Gabriel Díaz Fernández. Dicho lo cual, se verifica la adecuada capacidad que presenta esa solución. El apéndice restante se puede aprovechar habilitándolo como parte del paseo marítimo, como zona de pesca o mirador.

4.4. Cálculos.

Por último, esta sección tiene como objetivo presentar y emplear la formulación apropiada para el diseño de un dique rebasable. Principalmente, esta ha sido extraída de la obra de César Vidal (2013).

4.4.1. Operatividad y período de retorno.

Para poder determinar el periodo de retorno del oleaje de cálculo en las proximidades de las obras, se debe determinar el carácter general y operativo de las mismas, para lo cual se ha seguido la metodología propuesta en la ROM 0.0-01 “Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias” Parte I, capítulo segundo.

Con el carácter general de la obra se analiza la repercusión económica, social y ambiental que se produciría en caso de destrucción o pérdida de funcionalidad de la obra. En función del carácter general de la obra se determinarán la vida útil mínima de la misma, así como la máxima probabilidad conjunta de fallo.

El carácter general se determina a partir de unos índices concretos:

- Índice de repercusión económica. IRE.
- Índice de repercusión social y ambiental. ISA.

4.4.1.1. Índice de repercusión económica. IRE.

Este parámetro valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra, CRD, y por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con ella, CRI, previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma. El coeficiente IRE se define por la siguiente expresión:

$$IRE = \frac{(C_{RD} + C_{RI})}{C_0}$$

Donde C_0 , es un parámetro económico de adimensionalización. Estos costes se determinarán de acuerdo con los siguientes criterios:

- C_{RD} : Coste de inversión de las obras de reconstrucción de la obra marítima a su estado previo tras un temporal, en el año en que se valoren los costes por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra. A falta de estudios de detalle, simplificada, podrá considerarse que este coste es igual a la inversión inicial debidamente actualizada al año citado. En el caso de estudio el coste aproximado por metro lineal de dique es de 20.000 euros, por lo que para una longitud aproximada del dique de 300 m (como máximo), se cifra la inversión inicial en 6 M Euros (CRD).

- C_{RI} : Repercusiones económicas por cese e influencia de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra, ya sean oferentes de servicios creados tras su puesta en servicio o demandantes y causadas por daños en los bienes defendidos.

- C_0 : Parámetro económico de adimensionalización. Su valor depende de la estructura económica y del nivel de desarrollo económico del país donde se vaya a construir la obra, variando, en consecuencia, con el transcurso de tiempo, tomándose en España para el año horizonte en los que se valoran los costes C_{RD} y C_{RI} , $C_0 = 3$ M Euros.

En aquellos casos en los cuales no se realice una determinación detallada de C_{RI} , bien por razones de complejidad desproporcionada respecto a la magnitud de la obra, bien por falta de estudios previos, el cociente C_{RI} / C_0 , podrá estimarse cualitativamente y de forma aproximada, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = C * (A + B)$$

Donde A valora el ámbito del sistema económico y productivo, B la importancia estratégica del sistema económico y productivo y C la importancia de la obra para el sistema económico y productivo al que sirve. Estos coeficientes se determinan de la siguiente manera:

- A : Coeficiente del ámbito del sistema.
 - Local (1)
 - Regional (2)
 - Nacional/internacional (5)
- B : Coeficiente de importancia estratégica del sistema económico y productivo al que sirve:
 - Irrelevante (0)
 - Relevante (2)
 - Esencial (5)
- C : Coeficiente de importancia económica para el sistema económico y productivo al que sirve:
 - Irrelevante (0)
 - Relevante (1)
 - Esencial (2)

Con lo que queda:

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = C * (A + B) = 1 * (1 + 0) = 1$$

Finalmente el valor del IRE es:

$$IRE = \frac{C_{RD}}{C_0} + \frac{C_{RI}}{C_0} = \frac{6M \text{ euros}}{3M \text{ euros}} + 1 = 3$$

En función del valor obtenido para el índice de repercusión económica (IRE), se puede clasificar la obra marítima que nos ocupan de la siguiente forma:

- R1 obras con repercusión económica baja: $IRE < 5$.
- R2 obras con repercusión económica media: $5 < IRE < 20$.
- R3 obras con repercusión económica alta: $IRE > 20$.

4.4.1.2. Índice de repercusión social y ambiental. ISA.

Este índice estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de (1) pérdida de vidas humanas, (2) daños en el medio ambiente y el patrimonio histórico-artístico, y (3) de la alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.

El ISA se define pues por el sumatorio de tres subíndices: $ISA1 + ISA2 + ISA3$.

- ISA1: Subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas, que se obtiene según:

Remoto, es improbable que se produzcan daños a personas: 0.

Bajo, la pérdida de vidas humanas es posible pero poco probable (accidental), afectando a pocas personas: 3.

Alto, la pérdida de vidas humanas es muy probable pero afectando a un número no elevado de personas: 10.

Catastrófico, La pérdida de vidas humanas y daños a personas es tan grave que afecta a la capacidad de respuesta regional: 20.

- ISA2: subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico. Se asignarán los siguientes valores en función de la posibilidad, persistencia e irreversibilidad de daños en el medio ambiente o en el patrimonio histórico artístico:

Remoto, es improbable que se produzcan daños ambientales o al patrimonio: 0.

Bajo, daños leves reversibles (en menos de un año) o pérdidas de elementos de escaso valor: 2.

Medio, daños importantes pero reversibles (en menos de cinco años) o pérdidas de elementos significativos del patrimonio: 4.

Alto, daños irreversibles al ecosistema o pérdidas de unos pocos elementos muy importantes del patrimonio: 8.

Muy alto, daños irreversibles al ecosistema, implicando la extinción de especies protegidas o la destrucción de espacios naturales protegidos o un número elevado de elementos importantes del patrimonio: 15.

- ISA3: subíndice de alarma social. Se asignarán los siguientes valores en función de la intensidad de la alarma social generada.

Bajo, no hay indicios de que pueda existir una alarma social significativa asociada al fallo de la estructura: 0.

Medio, alarma social mínima asociada a valores de los subíndices ISA1 e ISA2 altos: 5.

Alarma social mínima debida a valores de los subíndices ISA1, catastrófico e ISA2, muy alto: 10.

Máximo, alarma social máxima: 15.

Por lo que queda un $ISA = ISA1 + ISA2 + ISA3 = 0 + 2 + 0 = 2$

En función del valor del índice de repercusión social y ambiental, ISA, las obras marítimas se clasificarán en:

- S1, obras sin repercusión social y ambiental significativa: $ISA < 5$.
- S2, obras con repercusión social y ambiental baja: $5 < ISA < 20$.
- S3, obras con repercusión social y ambiental alta: $20 < ISA < 30$.
- S4, obras con repercusión social y ambiental muy alta: $ISA > 30$.

4.4.1.3. Vida útil de la obra y máxima probabilidad de fallo.

La duración de la fase de servicio o vida útil (V_m) será, como mínimo, el valor consignado en función del IRE, según:

- IRE < 5: Vida útil **15 años**.
- IRE 6-20: Vida útil 25 años.
- IRE > 20: Vida útil 50 años.

La probabilidad conjunta de fallo $P_{f,ELU}$, de la obra frente a los modos de fallo principales adscritos a los estados límites últimos no excederá de los valores indicados en la siguiente tabla extraída de la ROM 0.0-01, en su vida útil.

ISA	<5	5-19	20-29	≥30
$P_{f,ELU}$	0.20	0.10	0.01	0.0001
β_{ELU}	0.84	1.28	2.32	3.71

Tabla 9: Máxima probabilidad conjunta en la vida útil para los E.L.U. ROM 0.0-01.

4.4.1.4. Periodo de retorno.

A continuación, se procede a calcular el periodo de retorno en años para el que se obtendrán las acciones de proyecto.

Debido a que los valores representativos de las acciones y cargas variables que actúan, se obtienen a partir de datos estadísticos, es preciso definir un valor característico máximo de una acción, como el extremal o excedente correspondiente a un periodo de retorno (T), asociado a una probabilidad de presentación o riesgo ($P_{f,ELU}$) durante el periodo de la vida útil de las obras (V_m).

La relación entre riesgo y periodo de retorno vendrá dada por una función estadística, que para el caso de una vida útil mayor a 10 años adopta la siguiente expresión:

$$P_{f,ELU} = 1 - \left[1 - \frac{1}{T}\right]^{V_m}$$

Despejando el periodo de la ecuación anterior, con V_m y T en años, queda el siguiente valor recomendado por la ROM para el periodo de retorno asociado al oleaje de cálculo:

$$T = 68 \text{ años}$$

4.4.2. Oleaje a pie de dique.

Para la determinación del oleaje de cálculo, se ha utilizado la serie DOW suministrada por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria “IH Cantabria”, al igual que en resto del proyecto. El tratamiento de los datos se ha realizado mediante el programa de “Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales” (AMEVA), también del IH Cantabria.

La obtención de los regímenes extremales escalares en los puntos objetivo se ha realizado mediante la selección del valor máximo anual de la variable correspondiente, ya que la serie original proporcionada es lo suficientemente extensa (67 años) como para que este método sea fiable:

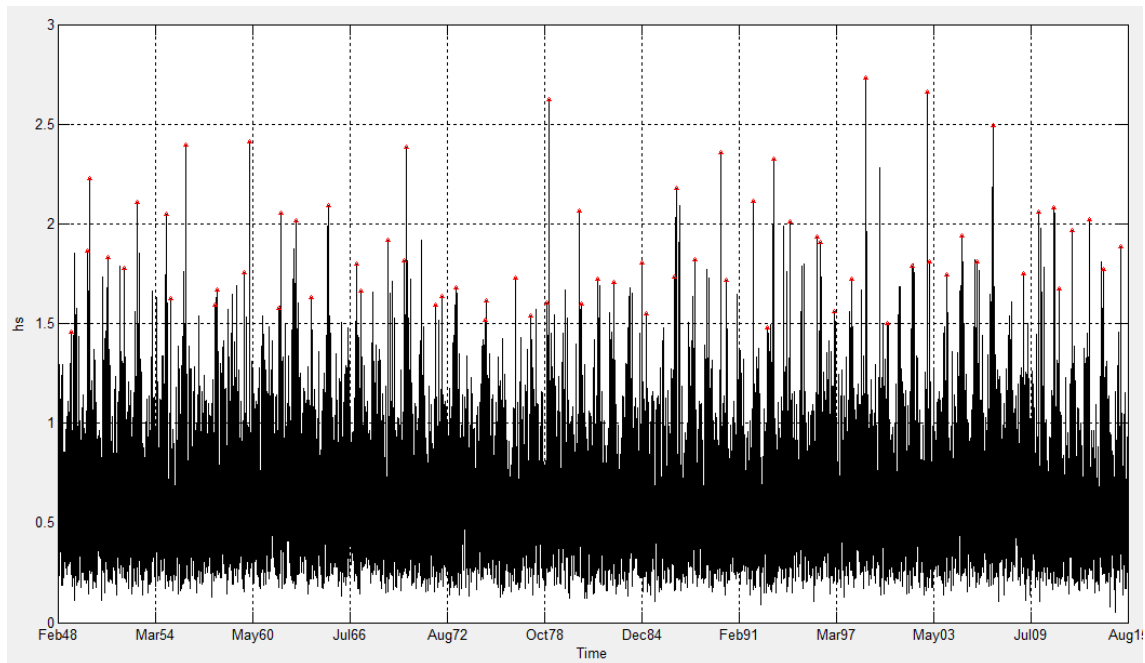


Fig. 39: Máximos anuales de altura de ola significativa.

Se ha hallado el régimen extremal de H_s con la función generalizada de valores extremos (GEV). Los parámetros de la misma son:

GEV Model:

$$F(x; \mu, \psi, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right]^{1/\xi} \right\}; \xi \neq 0, \exp \left\{ - \exp \left[\left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right] \right\}; \xi = 0$$

$$H_s(T_r; \mu, \psi, \xi) = \mu \frac{\psi}{\xi} \left(1 - \left(\frac{1}{T_r} \right)^{-\xi} \right)$$

$$\psi(t) = \exp \left(\alpha_o + \sum_{i=1}^p [\alpha_{2i-1} \cos(i\omega t) + \alpha_{2i} \sin(i\omega t)] \beta_T t + \sum_k \phi_k n_{k,t} \right)$$

$$\xi(t) = \gamma_o + \sum_{i=1}^p [\gamma_{2i-1} \cos(i\omega t) + \gamma_{2i} \sin(i\omega t)] \beta_T t + \sum_k \phi_k n_{k,t}$$

Model to Fit:

$$\mu(t) = \beta_o$$

$$\psi(t) = \exp(\alpha_o)$$

$$\xi(t) = \gamma_o$$

Model Fitted:

$$\mu(t) = \beta_o$$

$$\psi(t) = \exp(\alpha_o)$$

Results:

$$\beta_o = 1.750$$

$$\alpha_o = -1.502$$

Que se representan gráficamente en la siguiente gráfica de período de retorno – altura de ola
significante, con bandas de confianza del 95%

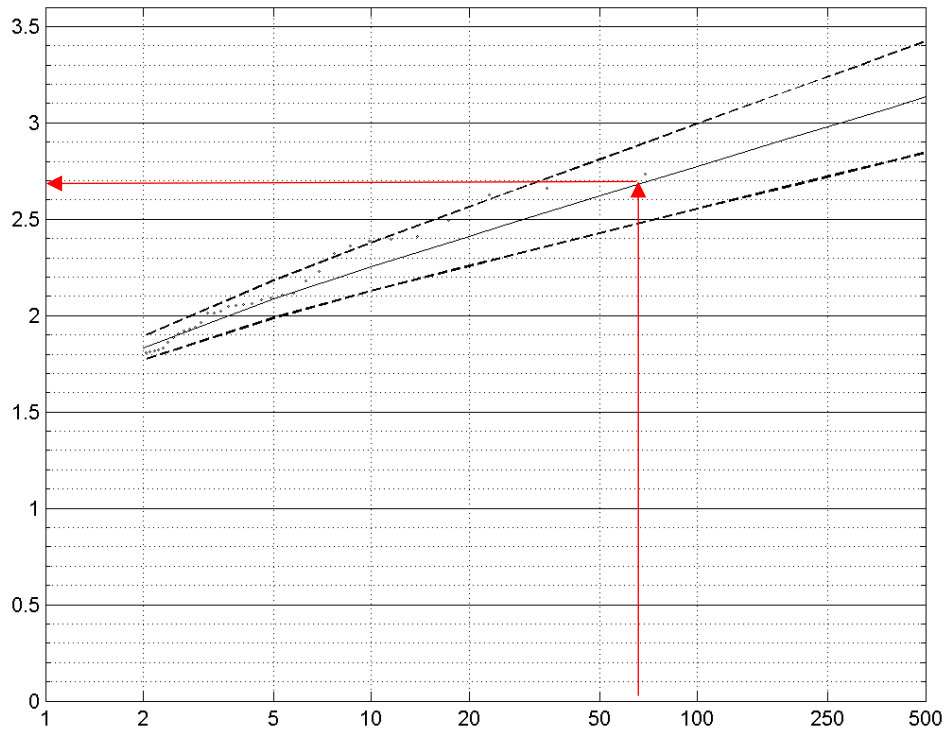


Fig. 40: Altura de ola significativa asociada al periodo de retorno

Para el periodo de retorno de 68 años, la altura de ola significativa que define el diseño es de 2.7 m.

A continuación se recurre a la sección 2.6 de la ROM 0.3-91, en la cual se indican las relaciones entre H_s y T_p , y entre T_m y T_p para las diversas áreas costeras de España. En el caso de Tenerife esta es:

E - REGISTROS INSTRUMENTALES: CORRELACIONES ALTURA DE OLA / PERIODO EN TEMPORALES					
BOYA	$P = H_s / L_T = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2}$	T_p / \bar{T}	RELACION FINAL $\frac{H_s (m)}{T_p (s)}$	VALORES DE DISEÑO	
				$H_s (m)$	$T_p (s)$
TENERIFE	0.02 - 0.06	=1.30	$T_p = (4.3-7.4)\sqrt{H_s}$	2	6.0-10.5
				4	8.5-14.5
				6	10.5-18.0

Tabla 10: Correlaciones entre parámetros de temporales para Tenerife (ROM 0.3-91)

Es decir que en este preciso caso:

$$T_p = (4.3 \leftrightarrow 7.4) * \sqrt{2.7} = 7.06 \text{ s} \leftrightarrow 12.16 \text{ s}$$

$$T_m = [7.06 \leftrightarrow 12.16 \text{ s}] / 1.3 = 5.43 \text{ s} \leftrightarrow 9.35 \text{ s}$$

Por otra parte debemos comprobar la rotura del oleaje por fondo. El oleaje está limitado por fondo debido a los calados existentes al pie de las estructuras, los cuales inducen la rotura de éste, especialmente en el caso de grandes periodos de retorno... Para ello se dispone de varios criterios. Una formulación sencilla y que ofrece buenos resultados es el criterio de Günbak (1977), $H_b = 0.8 * h$, que ha de emplearse para las situaciones de BMVE y PMVE.

A continuación se presenta un esquema para mejor comprensión.

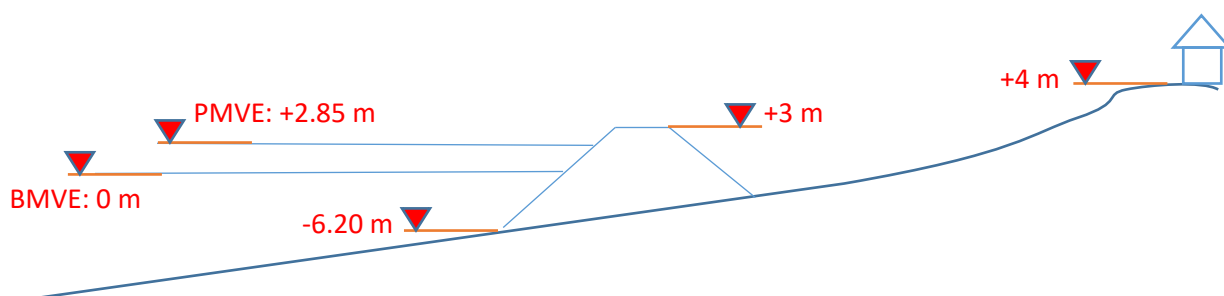


Fig. 41: Alturas de mareas y estructuras.

Dado que la batimetría está referenciada a la BMVE estaríamos hablando de una H_b de $0.8 * 6.20 = 5 \text{ m}$ de altura. En cuanto a la PMVE, hallada mediante la base de datos DOW, es de 2.85 m, con lo que queda H_b de $0.8 * (6.20 + 2.85) = 7.2 \text{ m}$. Será esta con la que se realicen los futuros cálculos.

Si la distribución de las olas a pie de dique antes de rotura fuera Rayleigh, la probabilidad de superar la altura de rotura en el temporal de cálculo es:

$$P(H > H_b) = \exp \left[-2 * \left(\frac{H_b}{H_s} \right)^2 \right] = \exp \left[-2 * \left(\frac{5.0}{2.7} \right)^2 \right] = 1.050 * 10^{-3}$$

$$P(H > H_b) = \exp \left[-2 * \left(\frac{H_b}{H_s} \right)^2 \right] = \exp \left[-2 * \left(\frac{7.2}{2.7} \right)^2 \right] = 6.658 * 10^{-7}$$

Es importante mencionar que la distribución de altura de ola en las zonas frente al dique, al estar en aguas reducidas, no siguen una distribución Rayleigh debido a que esta ha sido diseñada con datos del oleaje en aguas profundas. Sin embargo, para el cálculo de la altura de ola máxima y su posterior comparación con la altura de ola de rotura limitada por fondo, se considera suficientemente representativa.

Para hallar la duración del estado de mar, se ha hallado el máximo histórico de altura de ola significativa, y se ha considerado como temporal la franja temporal correspondiente a $H_s > 2\text{m}$, resultando 38 h. Esto se representa en la siguiente imagen:

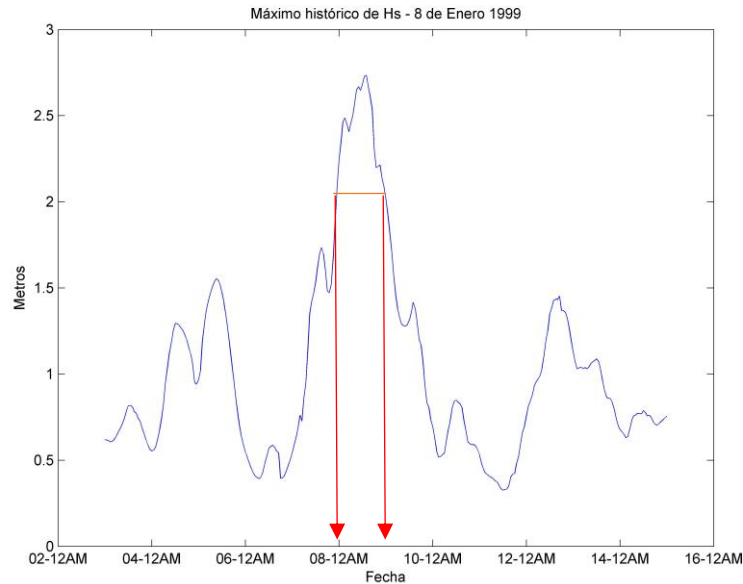


Fig. 42: Obtención del estado de mar de cálculo.

Una aproximación más certera consistiría en hallar la altura que define los 10 mayores temporales anuales (de al menos 2 horas), y en base a ello hacer una media de duraciones con la serie histórica de 60 años.

Sustituyendo el periodo medio y asumiendo que la duración del temporal de cálculo es de esas 24 h, el número de olas del temporal de cálculo será:

$$N = \frac{3600 * 24}{[5.43 \text{ s} \leftrightarrow 9.35 \text{ s}]} = 9241 \leftrightarrow 15912 \text{ olas}$$

Multiplicando por la probabilidad previamente hallada, se ve que no es usual que las olas rompan por fondo para ese periodo de retorno, especialmente en pleamar, que es el periodo más crítico para San Andrés.

H_s	N temporal	N rotas
5.0	9241	9
	15912	17
7.2	9241	0
	15912	0

Tabla 11: Rotura de olas por fondo en el mar de cálculo para bajamar y pleamar.

Dado el escaso número y ya que estas solo ocurren en bajamar se ha decidido ignorar la limitación en altura por fondo.

Para el diseño se utiliza, más concretamente, H_{50} , la altura media de las 50 mayores olas que alcanzan el dique. Los siguientes cálculos contienen relaciones de acuerdo a la distribución de Rayleigh.

$$\frac{H_{1/3}}{H_{rms}} = 1.416 = \frac{2.7}{H_{rms}} \rightarrow H_{rms} = 1.907 \text{ m}$$

$$H_{50} = H_{50/9241} = H_{1/184} \approx H_{1/200} \xrightarrow{\text{tablas}} \frac{H_{1/200}}{H_{rms}} = 2.503 = \frac{H_{1/200}}{1.907} \rightarrow H_{1/200} = 4.77 \text{ m}$$

$$H_{50} = H_{50/15912} = H_{1/318} \approx H_{1/300} \xrightarrow{\text{tablas}} \frac{H_{1/300}}{H_{rms}} \approx 2.560 = \frac{H_{1/300}}{1.907} \rightarrow H_{1/300} = 4.88 \text{ m}$$

Para estar del lado de la seguridad se considerará $H_{50} = 5 \text{ m}$.

4.4.3. Dimensionamiento de las piezas.

En este apartado se presenta la estimación preliminar del tamaño de piezas necesario para su estabilidad.

Inicialmente se presentan las condiciones geométricas y de clima marítimo consideradas en el cálculo. A continuación se detalla el cálculo de cada una de las piezas en función de su localización. Finalmente se detalla la sección propuesta para cada una de las alternativas de protección.

En cuanto a condiciones geométricas, las ya referidas en capítulos anteriores.

- Un talud 2H:1V (ángulo con la horizontal de 26.56°) tanto para la cara interior como exterior.
- El uso de bloques de hormigón en vez de escollera, esto se justifica mediante las solicitaciones de estabilidad que se verán posteriormente, que requieren pesos superiores a las 5 T, muy difíciles de obtener en cantera.
- Una cota de coronación de +3 m respecto a la BMVE, que implica el hecho de ser un dique rebasable.
- Una anchura de coronación (B) de 20 m, la ejecutada en Celeris. Esta permite una mayor estabilidad de la coronación y del talud posterior (Andersen et al. 1992).

Los diques rebasables son aquellos que, debido a su baja cota de coronación, han sido diseñados para permitir un rebase importante sobre la misma. Los diques rebasables se diseñan para permitir la transmisión de una parte importante de la energía del oleaje. El mecanismo de transmisión más importante es el rebase sobre la coronación, aunque la transmisión a través del dique puede ser significativa, especialmente en el caso de diques arrecifes, en los que el tamaño de la escollera del núcleo es similar a la del manto principal.

El parámetro más utilizado para definir la estabilidad de las piezas del manto exterior de diques en talud es el número de estabilidad, N_s , que representa la relación entre las fuerzas de arrastre del oleaje y las resistentes de las piezas, definidas por su peso sumergido:

$$N_s = \frac{H_{50}}{\Delta * D}$$

Donde:

D es un tamaño característico de las piezas.

H_{50} es la altura media de las 50 mayores olas que alcanzan la estructura en su vida útil.

$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$ es la densidad relativa sumergida de las piezas. Siendo ρ_s la densidad de las piezas y ρ_w la del agua.

La formulación a emplear es presentada por Vidal *et al.* en 2013, siendo un estudio más exhaustivo del ya realizado en 1992, que surge de situaciones más desfavorables, provocando mayores pesos de piezas y quedando del lado de la seguridad.

El proceso consiste en utilizar el número de estabilidad tanto como nexo entre diques rebasables, pues la experimentación se basa en un dique de talud 2H:3V y el que pretendemos diseñar es de 2H:1V.

Utilizando las bases de datos de estabilidad de diques rebasables de Delft 1988, NRC 1992, Delft 1995, UCA 2001 y Aalborg 2002, Vidal et. Al llegan a la siguiente formulación:

$$N_s = \frac{H_{50}}{\Delta * D} = 4.44 * P^{0.18} * S^{0.2} * I_{rm}^{-0.5} \text{ para } I_{rm} < I_{rmc} \text{ y } \cot \alpha < 4$$

$$N_s = \frac{H_{50}}{\Delta * D} = 0.716 * P^{-0.13} * S^{0.2} * \sqrt{\cot \alpha} * I_{rm}^P \text{ para } I_{rm} \geq I_{rmc} \text{ y } \cot \alpha \geq 4$$

Que supone una función continua con el límite entre ambas para $I_{rm} = I_{rmc}$. P es el parámetro de permeabilidad de van der Meer (1988), que para la tipología típica de los diques rebasables tiene un valor aproximado de $P = 0.5$, I_{rm} es el número de Iribarren correspondiente al periodo medio y I_{rmc} es el número de Iribarren crítico, definido por la siguiente expresión:

$$I_{rmc} = (6.2 * P^{0.31} * \sqrt{\tan \alpha})^{\frac{1}{P+0.5}} = (6.2 * 0.5^{0.31} * \sqrt{0.5})^{\frac{1}{0.5+0.5}} = 3.54$$

S es el parámetro adimensional de daño, que depende del sector del dique considerado, según la siguiente tabla para Inicio de Avería:

VALORES DE S PARA INICIO DE AVERIA	
TALUD EXTERIOR	1.00
CORONACIÓN	1.00
TALUD INTERIOR	0.50
MORRO EXTERIOR	0.30
MORRO INTERIOR	0.30

Fig. 43: Valores de S para Inicio de Avería en los distintos sectores de diques rebasables.

Un último apunte previo dimensionamiento de las piezas: las curvas han sido obtenidas para diques de escollera, por lo que su aplicación para el diseño del manto principal mediante bloques cúbicos de hormigón hay que realizar una hipótesis adicional. Para ello, se asume que la relación de pesos entre las piezas de escollera y los bloques cúbicos de hormigón es la misma que se obtiene para los diques en talud no rebasables:

El peso de las piezas correspondientes a un dique no rebasable, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W_{50} = \rho_w R \psi_{nr} H_{50}^3$$

Donde:

ρ_w es la densidad del agua de mar

ρ_s es la densidad escollera (2.70 t/m³) o del hormigón (2.35 t/m³)

$$R = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3}; S_r = \rho_s / \rho_w$$

Ψ_{nr} es el valor máximo de la función de estabilidad correspondiente a la banda superior de confianza del 95 %.

Para el caso de un dique de escollera de talud 2, $\Psi_{nr}=0.0462$ según la formulación de Losada-Giménez Curto (1979).

En el caso de bloques paralelepípedos de talud 2, $\Psi_{nr}=0.047$, según se extrae de Losada y Desiré (1985).

Con lo que la relación de pesos entre bloque de hormigón y escollera queda:

$$\frac{W_{cubos}}{W_{escollera}} = \frac{\rho_w R_{cubos} \psi_{nrCubos} H_{50}^3}{\rho_w R_{esc} \psi_{nrEsc} H_{50}^3} = \frac{R_{cubos} \psi_{nrCubos}}{R_{esc} \psi_{nrEsc}} = \frac{1.0613 \cdot 0.047}{0.6036 \cdot 0.0462} = 1.79$$

Es decir, al peso obtenido para las piezas de escollera, mediante las formulaciones de Vidal *et al.* (2013), hay que incrementarle en un 79 % para obtener el peso necesario para la disposición de bloques cúbicos de hormigón.

El siguiente punto consiste en hallar el I_{rm} , para ello se emplean los datos del oleaje a pie de dique anteriores en una formulación de Hunt (1979) consultada en el EurOtop Hunt de 2016:

$$(kh)^2 = x^4 + \frac{x^2}{1 + \sum_{\beta=1}^6 d_{\beta} * x^{2\beta}}$$

Donde:

$$x = \frac{\omega h}{\sqrt{gh}}; \omega = \frac{2\pi}{T}; k = \frac{2\pi}{L}$$

$$d1 = 0.6; d2 = 0.35; d3 = 0.160845608; d4 = 0.0632098765; d5 = 0.0217540484$$

Empleando el valor medio de $T_m = 5.43 \text{ s} \leftrightarrow 9.35 \text{ s}$ correspondiente a $H_s = 2.7 \text{ m}$ se obtiene $L = 36 \text{ m} \leftrightarrow 69 \text{ m}$. Usar el mayor L permite ser más conservativos a la hora de hallar la dimensión de las piezas mediante la formulación indicada.

$$I_{rm} = \frac{tg \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} = \frac{0.5}{\sqrt{\frac{2.7}{69}}} = 2.52$$

A continuación se procede a dimensionar cada región del dique...

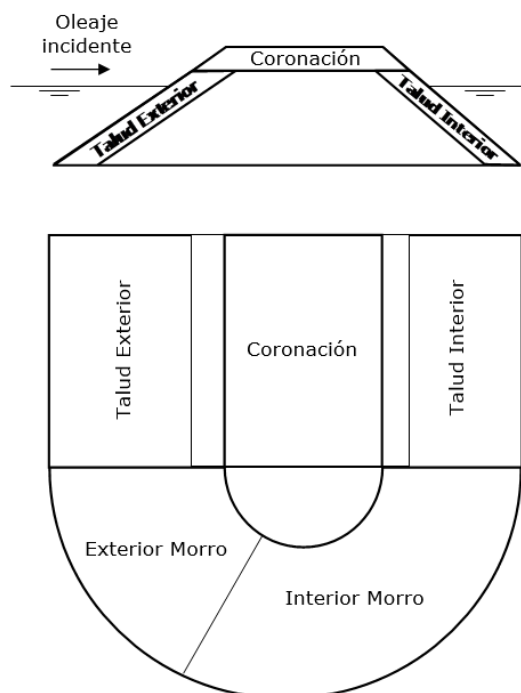


Fig. 44: Definición de los diferentes sectores de un dique rebasable.

TALUD EXTERIOR

Se obtiene D_{50} con la fórmula anterior y teniendo en cuenta el daño para inicio de avería en esta región en concreto:

$$\frac{H_{50}}{\Delta * D_{50}} = 4.44 * P^{0.18} * S^{0.2} * I_{rm}^{-0.5} \text{ para } I_{rm} < I_{rmc} \text{ y } \cot \alpha < 4$$

$$\frac{5}{\left(\frac{2.700}{1.025} - 1\right) * D_{50}} = 4.44 * 0.5^{0.18} * 1^{0.2} * 2.52^{-0.5} \text{ ya que } 2.52 < 3.54 \text{ y } 2 < 4$$

$$D_{50} = 0.92 \text{ m}$$

Se halla el francobordo adimensional. En este caso se ha comprobado que es más crítico en bajar para el número de estabilidad.

$$F_d = \frac{F}{D_{50}} = \frac{3}{0.92} = 3.26$$

Se obtiene el $N_{s\ 50}$ según la formulación de Vidal et al. para la presente sección:

$$N_{s\ 50} = 2.60 - 0.33 * F_d \quad \text{con } N_{s\ 50\ min} = \begin{cases} 1.94 \text{ si } \cot \alpha = 1.5 \\ 2.085 \text{ si } \cot \alpha = 2.0 \end{cases} \text{ y } F_d \geq -4.5$$

$$N_{s\ 50} = 2.60 - 0.33 * 3.26 = 1.52, \text{ por tanto se selecciona el mínimo: } N_{s\ 50} = 2.085$$

Con lo que resulta el nuevo D_{50} de escollera:

$$D_{50} = \frac{H_{50}}{\Delta * N_s} = \frac{5}{\left(\frac{2.7}{1.025} - 1\right) * 2.085} = 1.467 \text{ m}$$

La dimensión es convertida a peso en escollera y esta a peso del bloques cúbicos de hormigón, mediante la relación definida anteriormente:

$$W_{50} = D_{50}^3 * \rho_s * 1.79 = 1.467^3 * 2700 * 1.79 = 15258 \text{ kg}$$

Y finalmente el D_{50} de hormigón:

$$D_{50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{15258}{2350}} = 1.865 \text{ m}$$

CORONACIÓN

El daño para Inicio de Avería es el mismo ($S=1$), resulta el mismo valor $D_{50} = 0.92 \text{ m}$

Sin embargo, el francobordo mas conservativo en este caso es el de pleamar:

$$F_d = \frac{F}{D_{50}} = \frac{0.15}{0.92} = 0.111$$

Se obtiene el $N_{s\ 50}$ según las formulación de Vidal et al. para la presente sección:

$$N_{s\ 50} = -1.21 * F_d - 0.28 \text{ para } -4 \leq F_d \leq -2$$

$$N_{s\ 50} = 2.15 \text{ para } -2 < F_d < 2 \longrightarrow N_{s\ 50} = 2.15$$

$$N_{s\ 50} = 1.02 * F_d + 0.115 \text{ para } 2 \leq F_d \leq 4$$

Las curvas propuestas son una envolvente inferior de todos los ensayos realizados, sin distinguir la pendiente del talud. Dado que el flujo de rebase, causante de la inestabilidad, era muy parecido con talud 1.5/1 y 2/1., se optó por no separar la información.

Con lo que resulta el nuevo D_{50} de escollera:

$$D_{50} = \frac{H_{50}}{\Delta * N_{s\ 50}} = \frac{5}{\left(\frac{2.7}{1.025} - 1\right) * 2.15} = 1.42 \text{ m}$$

La dimensión es convertida a peso en escollera y esta a peso del bloques cúbicos de hormigón, mediante la relación definida anteriormente:

$$W_{50} = D_{50}^3 * \rho_s * 1.79 = 1.42^3 * 2700 * 1.79 = 13838 \text{ kg}$$

Y finalmente el D_{50} de hormigón:

$$D_{50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{13838}{2350}} = 1.80 \text{ m}$$

TALUD INTERIOR

Se obtiene D_{50} con la fórmula anterior y teniendo en cuenta el daño para inicio de avería en esta región en concreto:

$$\frac{H_{50}}{\Delta * D_{50}} = 4.44 * P^{0.18} * S^{0.2} * I_{rm}^{-0.5} \text{ para } I_{rm} < I_{rmc} \text{ y } \cot \alpha < 4$$

$$\frac{5}{\left(\frac{2.700}{1.025} - 1\right) * D_{50}} = 4.44 * 0.5^{0.18} * 0.5^{0.2} * 2.52^{-0.5} \text{ ya que } 2.52 < 3.54 \text{ y } 2 < 4$$

$$D_{50} = 1.42 \text{ m}$$

Se halla el francobordo adimensional. En este caso se ha comprobado que es más crítico en bajar para el número de estabilidad.

$$F_d = \frac{F}{D_{50}} = \frac{3}{1.42} = 2.11$$

Se obtiene el $N_{s\ 50}$ según las formulación de Vidal et al. para la presente sección:

$$N_{s\ 50} = -0.48 * F_d + 2.86 \text{ para } -4.5 \leq F_d \leq 2$$

$$N_{s\ 50} = 1.9 \text{ para } F_d > 2 \quad \longrightarrow \quad N_{s\ 50} = 1.9$$

Nuevamente, las curvas no distinguen entre taludes. De hecho, una mayor pendiente en el talud interior no implica necesariamente una menor estabilidad, porque depende de si el chorro de rebalse ataca directamente el talud o cae sobre un colchón de agua.

Con lo que resulta el D_{50} de escollera rebasable de talud 1.5:

$$D_{50} = \frac{H_{50}}{\Delta * N_s} = \frac{5}{\left(\frac{2.7}{1.025} - 1\right) * 1.9} = 1.61 \text{ m}$$

La dimensión es convertida a peso en escollera y esta a peso del bloques cúbicos de hormigón, mediante la relación definida anteriormente:

$$W_{50} = D_{50}^3 * \rho_s * 1.79 = 1.61^3 * 2700 * 1.79 = 20169 \text{ kg}$$

Y finalmente el D_{50} de hormigón:

$$D_{50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{20169}{2350}} = 2.047 \text{ m}$$

TALUD INTERIOR DEL MORRO

Se obtiene D_{50} con la fórmula anterior y teniendo en cuenta el daño para inicio de avería en esta región en concreto:

$$\frac{H_{50}}{\Delta * D_{50}} = 4.44 * P^{0.18} * S^{0.2} * I_{rm}^{-0.5} \text{ para } I_{rm} < I_{rmc} \text{ y } \cot \alpha < 4$$

$$\frac{5}{\left(\frac{2.700}{1.025} - 1\right) * D_{50}} = 4.44 * 0.5^{0.18} * 0.3^{0.2} * 2.52^{-0.5} \text{ ya que } 2.52 < 3.54 \text{ y } 2 < 4$$

$$D_{50} = 1.58 \text{ m}$$

Se halla el francobordo adimensional. En este caso se ha comprobado que es más crítico en bajar para el número de estabilidad.

$$F_d = \frac{F}{D_{50}} = \frac{3}{1.58} = 1.90$$

Se obtiene el N_{s50} según la formulación de Vidal et al. para la presente sección:

$$N_{s50} = -0.58 * F_d + 1.99 \text{ con } N_{s50 \min} = \begin{cases} 1.69 \text{ si } \cot \alpha = 1.5 \\ 1.81 \text{ si } \cot \alpha = 2.0 \end{cases} \text{ y } -4 \leq F_d \leq 2$$

$$N_{s50} = -0.58 * 1.90 + 1.99 = 0.88, \text{ por tanto se selecciona el mínimo: } N_{s50} = 1.81$$

Con lo que resulta el nuevo D_{50} de escollera:

$$D_{50} = \frac{H_{50}}{\Delta * N_s} = \frac{5}{\left(\frac{2.7}{1.025} - 1\right) * 1.81} = 1.69 \text{ m}$$

La dimensión es convertida a peso en escollera y esta a peso del bloques cúbicos de hormigón, mediante la relación definida anteriormente:

$$W_{50} = D_{50}^3 * \rho_s * 1.79 = 1.69^3 * 2700 * 1.79 = 23346 \text{ kg}$$

Y finalmente el D_{50} de hormigón:

$$D_{50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{23346}{2350}} = 2.15 \text{ m}$$

TALUD EXTERIOR DEL MORRO

Vidal et al. no proporciona esta formulación, por lo que se cree conveniente ejecutarlo de igual modo que el interior, siendo este la región más desfavorable del dique y por tanto el diseño más conservativo.

FILTROS

Una vez concluido el diseño del manto principal se procede al diseño del secundario. La misión de los mantos secundarios de un dique en talud es doble:

- 1) facilitar una condición de filtro desde los tamaños correspondientes al manto principal a los del núcleo
- 2) generar suficiente rozamiento entre capas de manera que no se faciliten planos de deslizamiento.

Para el cumplimiento de la condición de filtro y de rozamiento entre capas, las reglas de buena práctica recomiendan la siguiente relación de pesos de las piezas de capas sucesivas:

- Manto principal/ 1^{er} manto secundario: $W_{50}/w_{50} < 10$
- Entre mantos secundarios: $10 < W_{50}/w_{50} < 20$
- Entre manto secundario y núcleo: $10 < W_{50}/w_{50} < 20$

Si se aplican estas recomendaciones se obtendría la siguiente configuración...

CONCLUSION

Para el manto principal dispondrán 2 capas de bloques cúbicos de hormigón ($\rho=2350 \text{ kg/m}^3$) en cada región, adquiriendo por tanto un espesor de aproximadamente el doble de su lado. Por facilitar la construcción se agruparán todos se ha considerado prudente utilizar los mismos bloques para todas las secciones menos el morro.

MANTO PRINCIPAL	$D_n [m]$	$W_{50} [t]$
TALUD EXTERIOR	1.87 → 2.04	15.3 → 20
CORONACIÓN	1.80 → 2.04	13.8 → 20
TALUD INTERIOR	2.05 → 2.04	20.2 → 20
MORRO	2.15 → 2.14	23.3 → 23

Tabla 12: Dimensiones definitivas de los bloques del manto principal.

Por condición de rozamiento y filtro entre capas, si el primer manto secundario exterior se realiza con piezas de hormigón, su peso debería ser 1/10 del peso de las piezas del manto principal interior. Por tanto en el manto secundario se utilizará escollera ($\rho=2700 \text{ kg/m}^3$), pues el peso ya es inferior a 3-5 toneladas, que suele ser el máximo extraíble en cantera. Estas se disponen en 2 capas.

MANTO SECUNDARIO	$D_n [m]$	$W_{50} [t]$
TALUD EXTERIOR	0.90	2.0
CORONACIÓN	0.90	2.0
TALUD INTERIOR	0.90	2.0
MORRO	0.95	2.3

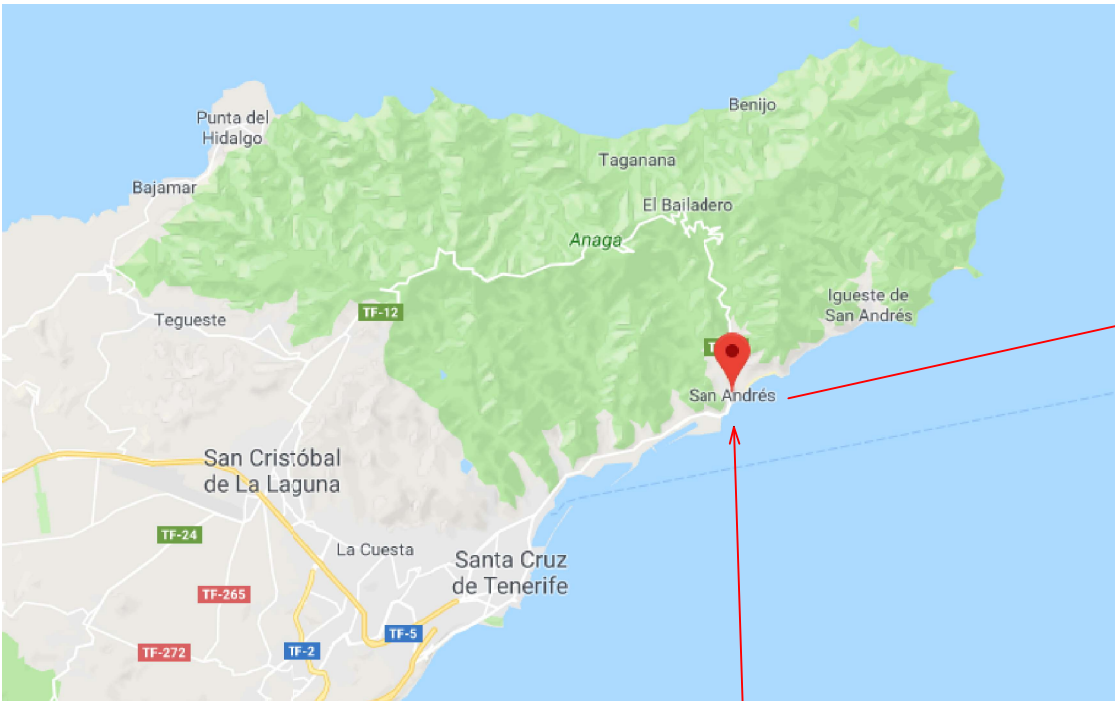
Tabla 13: Dimensiones definitivas de la escollera del primer manto secundario.

El segundo manto secundario exterior estará formado por escolleras con un peso comprendido entre 1/10 y 1/20 del peso de las piezas del primer manto secundario exterior. En este tipo de situaciones en las que el manto secundario sería muy similar al dique, la solución que se suele adoptar es disponer una pequeña capa de transición. En este caso se ha decidido hacerla de 200 kg, para todas las regiones del dique.

Finalmente, debajo de este segundo manto se situará un núcleo todo uno de cantera cuya granulometría se encuentre en los intervalos $[1 < W_{50} (kg) < 100]$, pudiendo tener como máximo un 10% de material inferior a 1 kg y un 5% de material superior a 100 kg.

Apéndice I: Planos

A continuación se adjuntan todos los planos necesarios para comprender la batimetría de la zona y la solución adoptada finalmente.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS DE
SANTANDER

TIPO:
Estudio de Hidrología

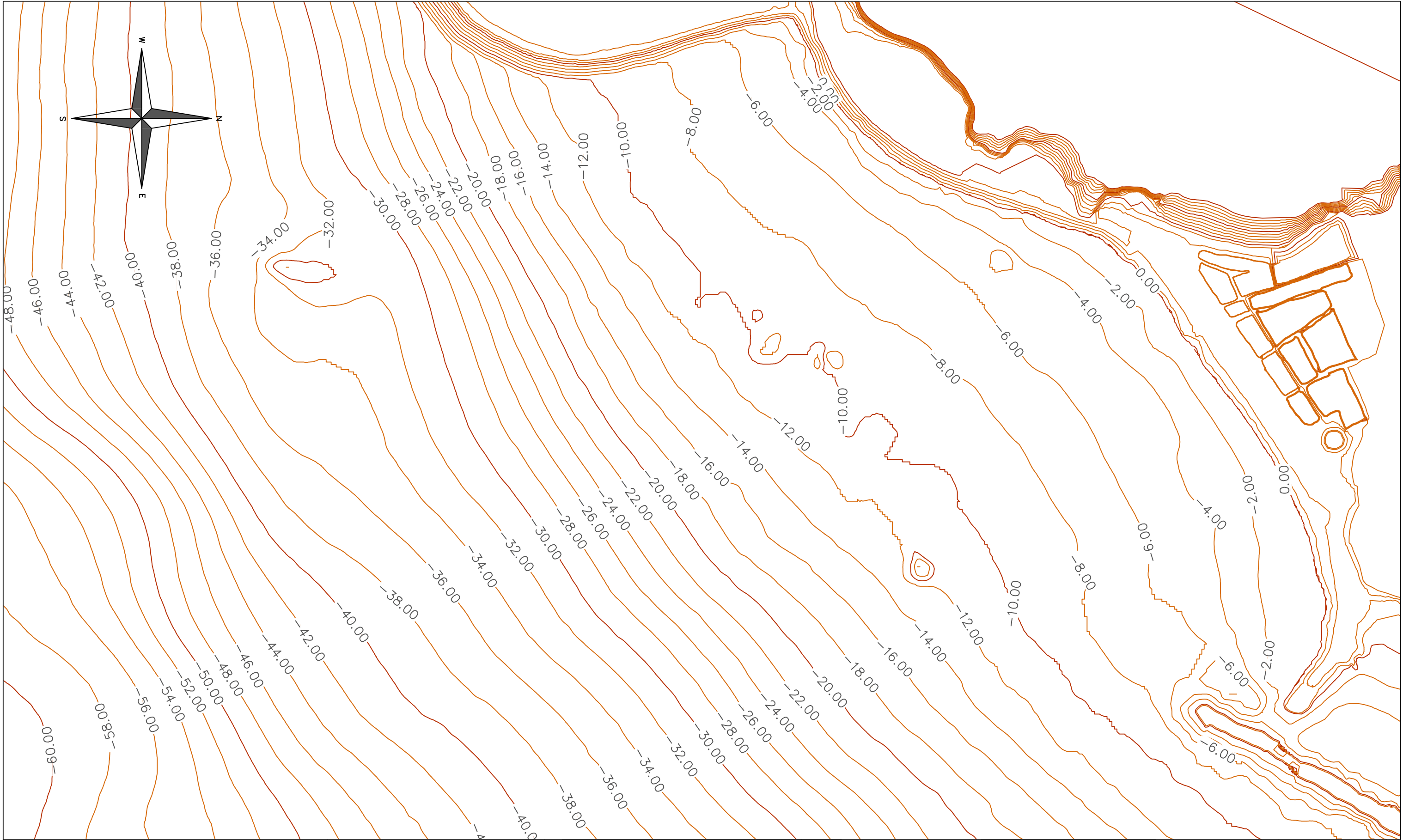
TÍTULO:
Localización geográfica de
San Andrés


LOCALIDAD:
San Andrés
MUNICIPIO:
Santa Cruz de Tenerife

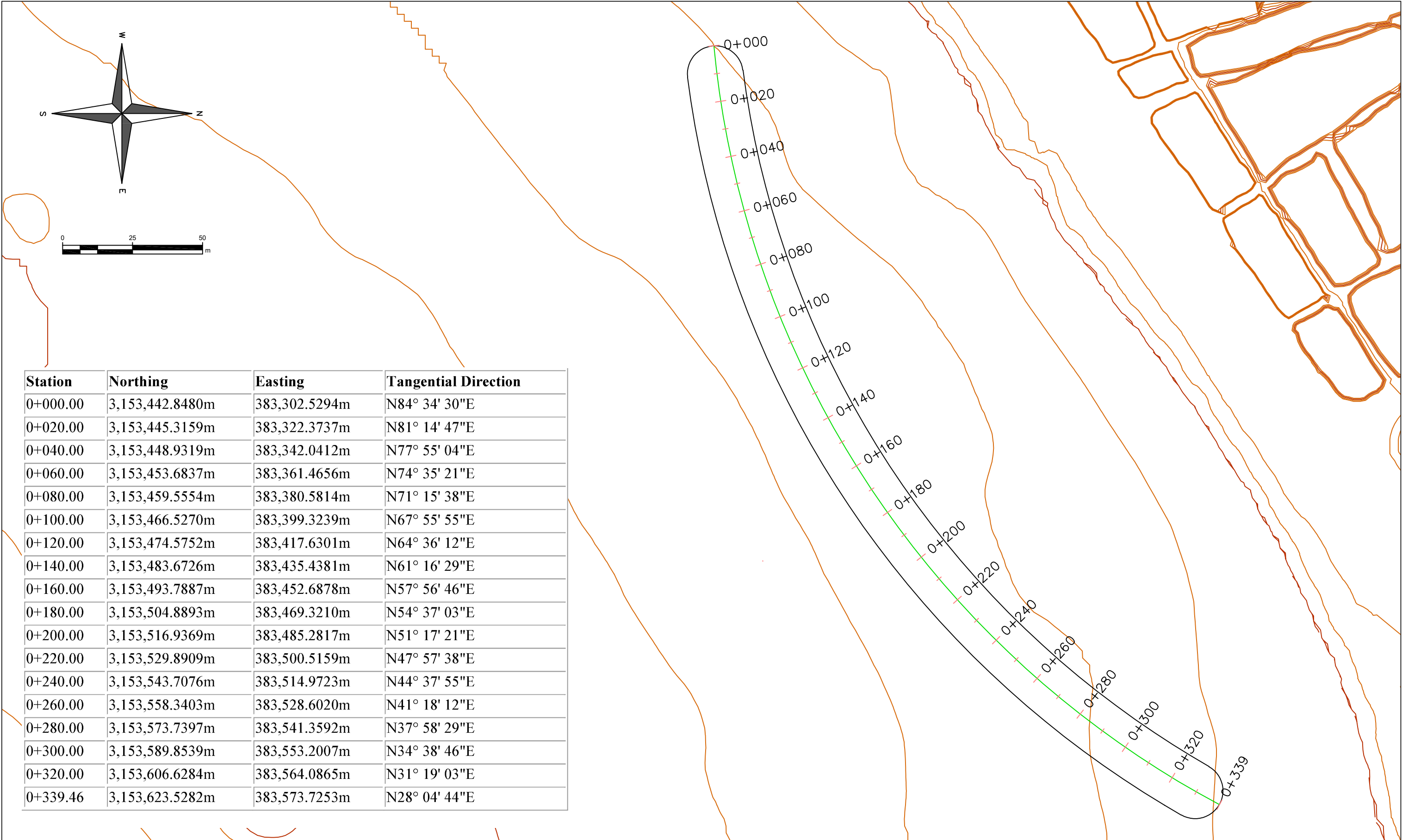
AUTOR:
Manuel Queijeiro Rilo

ESCALA:
—
FECHA:
Junio 2018

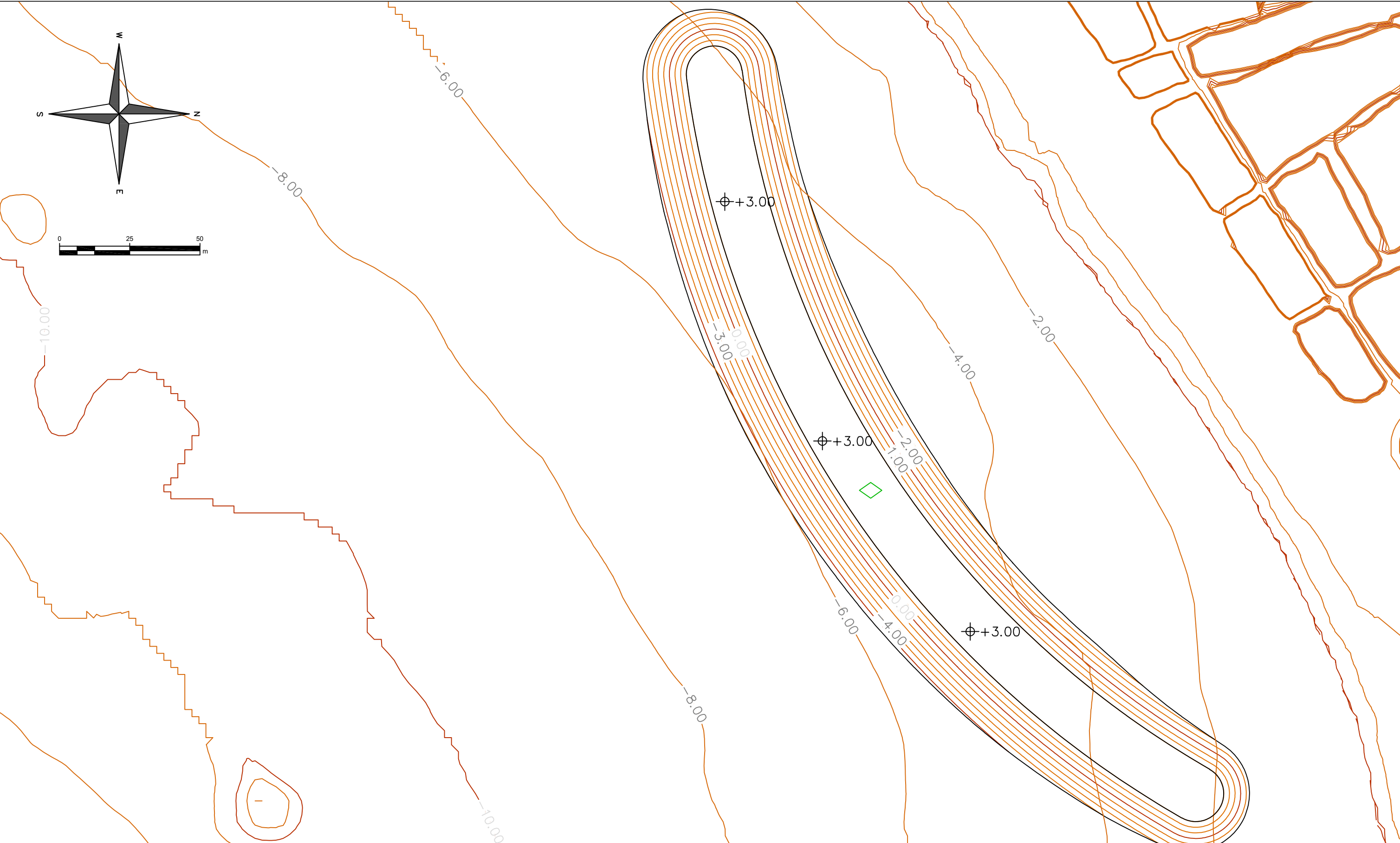
PLANO:
1




	ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER	TIPO: Estudio de Hidrología	TÍTULO: Batimetría de San Andrés	LOCALIDAD: San Andrés	AUTOR: Manuel Queijeiro Rilo	ESCALA: 1: 3500	PLANO: 2
				MUNICIPIO: Santa Cruz de Tenerife		FECHA: Junio 2018	



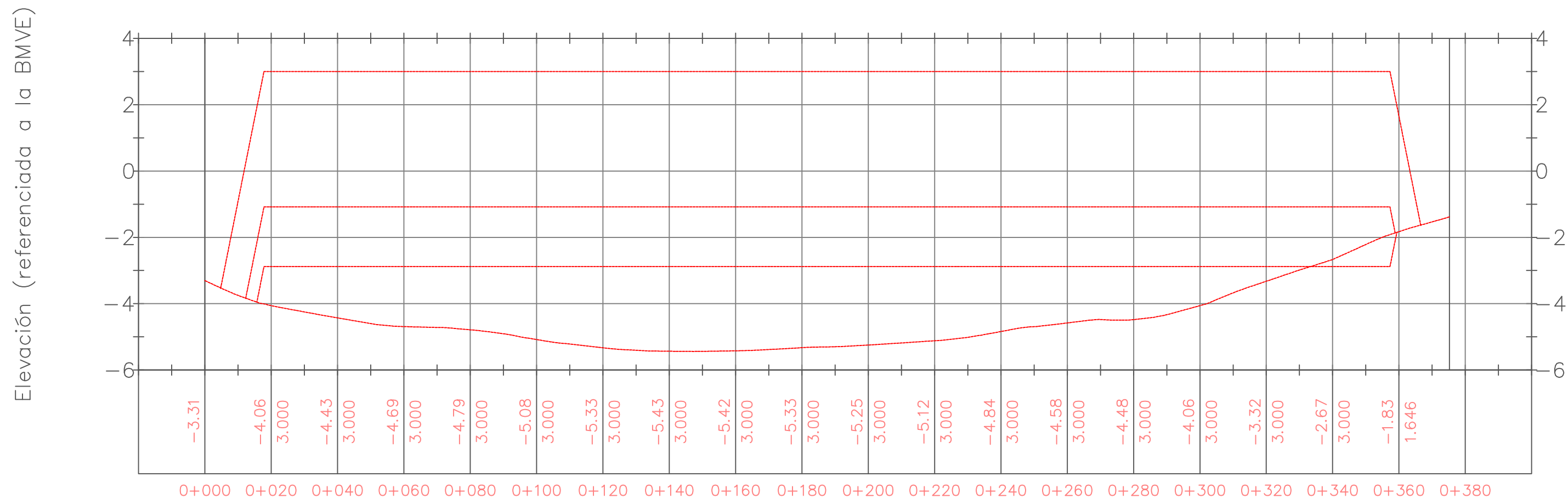
Station	Northing	Easting	Tangential Direction
0+000.00	3,153,442.8480m	383,302.5294m	N84° 34' 30"E
0+020.00	3,153,445.3159m	383,322.3737m	N81° 14' 47"E
0+040.00	3,153,448.9319m	383,342.0412m	N77° 55' 04"E
0+060.00	3,153,453.6837m	383,361.4656m	N74° 35' 21"E
0+080.00	3,153,459.5554m	383,380.5814m	N71° 15' 38"E
0+100.00	3,153,466.5270m	383,399.3239m	N67° 55' 55"E
0+120.00	3,153,474.5752m	383,417.6301m	N64° 36' 12"E
0+140.00	3,153,483.6726m	383,435.4381m	N61° 16' 29"E
0+160.00	3,153,493.7887m	383,452.6878m	N57° 56' 46"E
0+180.00	3,153,504.8893m	383,469.3210m	N54° 37' 03"E
0+200.00	3,153,516.9369m	383,485.2817m	N51° 17' 21"E
0+220.00	3,153,529.8909m	383,500.5159m	N47° 57' 38"E
0+240.00	3,153,543.7076m	383,514.9723m	N44° 37' 55"E
0+260.00	3,153,558.3403m	383,528.6020m	N41° 18' 12"E
0+280.00	3,153,573.7397m	383,541.3592m	N37° 58' 29"E
0+300.00	3,153,589.8539m	383,553.2007m	N34° 38' 46"E
0+320.00	3,153,606.6284m	383,564.0865m	N31° 19' 03"E
0+339.46	3,153,623.5282m	383,573.7253m	N28° 04' 44"E




	ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER	TIPO: Estudio de Hidrología	TÍTULO: Vista en planta de la superficie del dique	LOCALIDAD: San Andrés	AUTOR: Manuel Queijeiro Rilo	ESCALA: 1:1250	PLANO: 4
				MUNICIPIO: Santa Cruz de Tenerife		FECHA: Junio 2018	

Sección longitudinal del eje del dique rebasable

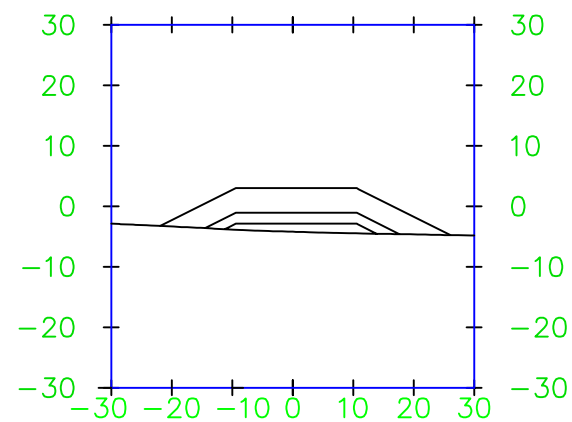
Manto ppal. (+3.00 m), sec.(−1.08 m), y núcleo (−2.88 m), junto a la batimetría



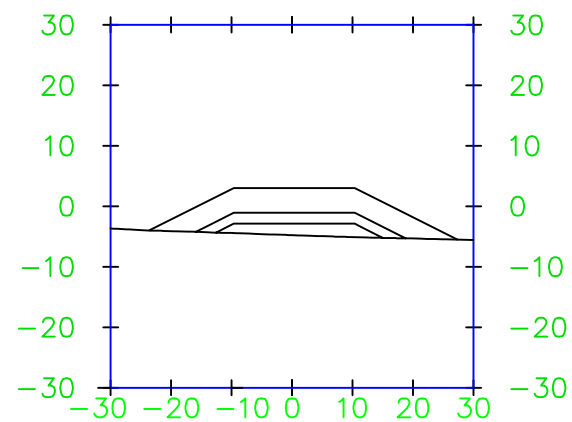
NOTA: Se ignorará el desmonte presente en el extremo este del núcleo dada su pequeña dimensión y relevancia en las capacidades funcionales de la obra

	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER	TIPO: Estudio de Hidrología	TÍTULO: Sección longitudinal del eje de dique rebasable	LOCALIDAD: San Andrés	AUTOR: Manuel Queijeiro Rilo	ESCALA: H=1:1250 V=1:125	PLANO: 5
				MUNICIPIO: Santa Cruz de Tenerife		FECHA: Junio 2018	

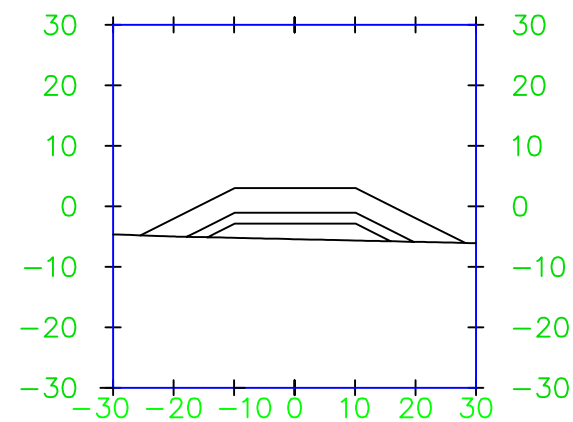
0+010.00



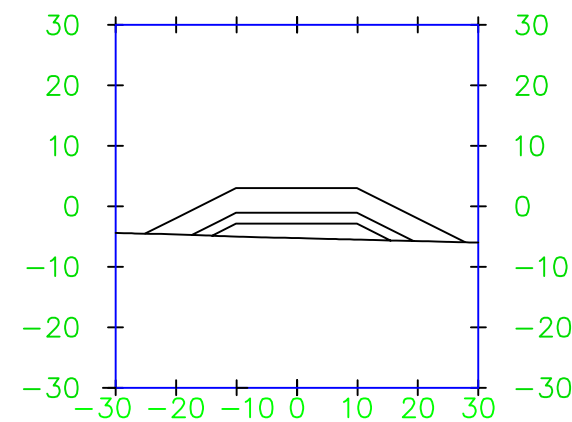
0+060.00



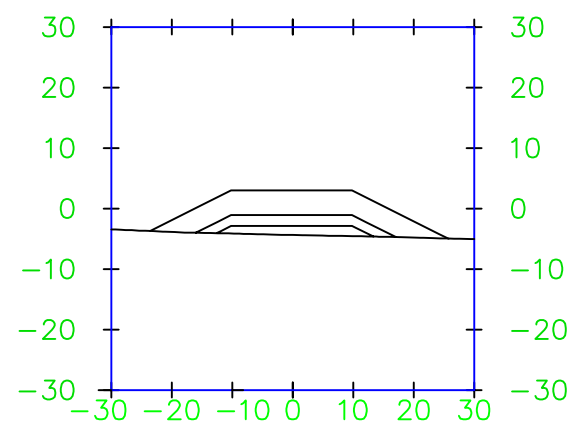
0+120.00



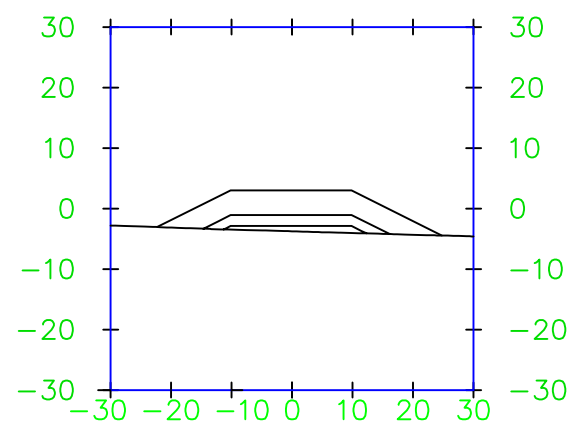
0+180.00



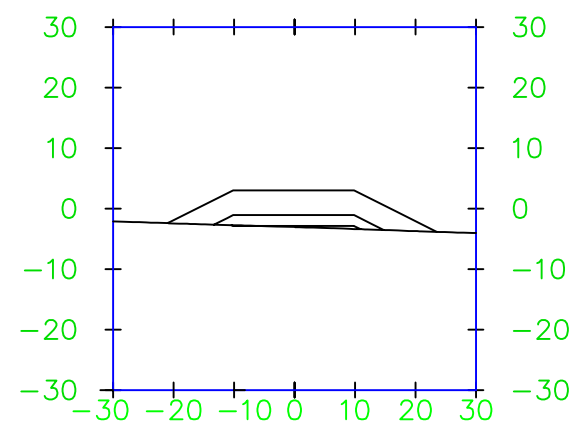
0+270.00



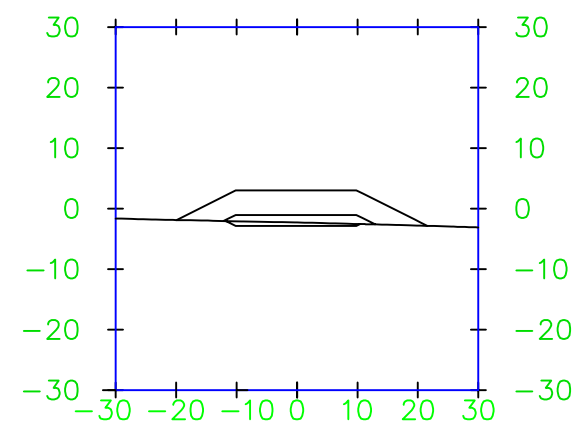
0+290.00



0+310.00



0+330.00



VOLUMEN DEL MANTO PRINCIPAL=27048.31 m³; VOLUMEN DEL PRIMER MANTO SECUNDARIO=14684.07 m³; VOLUMEN DEL FILTRO DE ESCOLLERA=3992.85 m³; VOLUMEN DEL NÚCLEO=14164.76 m³

NOTA: Se ignorará el desmonte presente en el extremo este del dique dada su pequeña dimensión y relevancia en las capacidades funcionales de la obra



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS DE
SANTANDER

TIPO:
Estudio de Hidrología

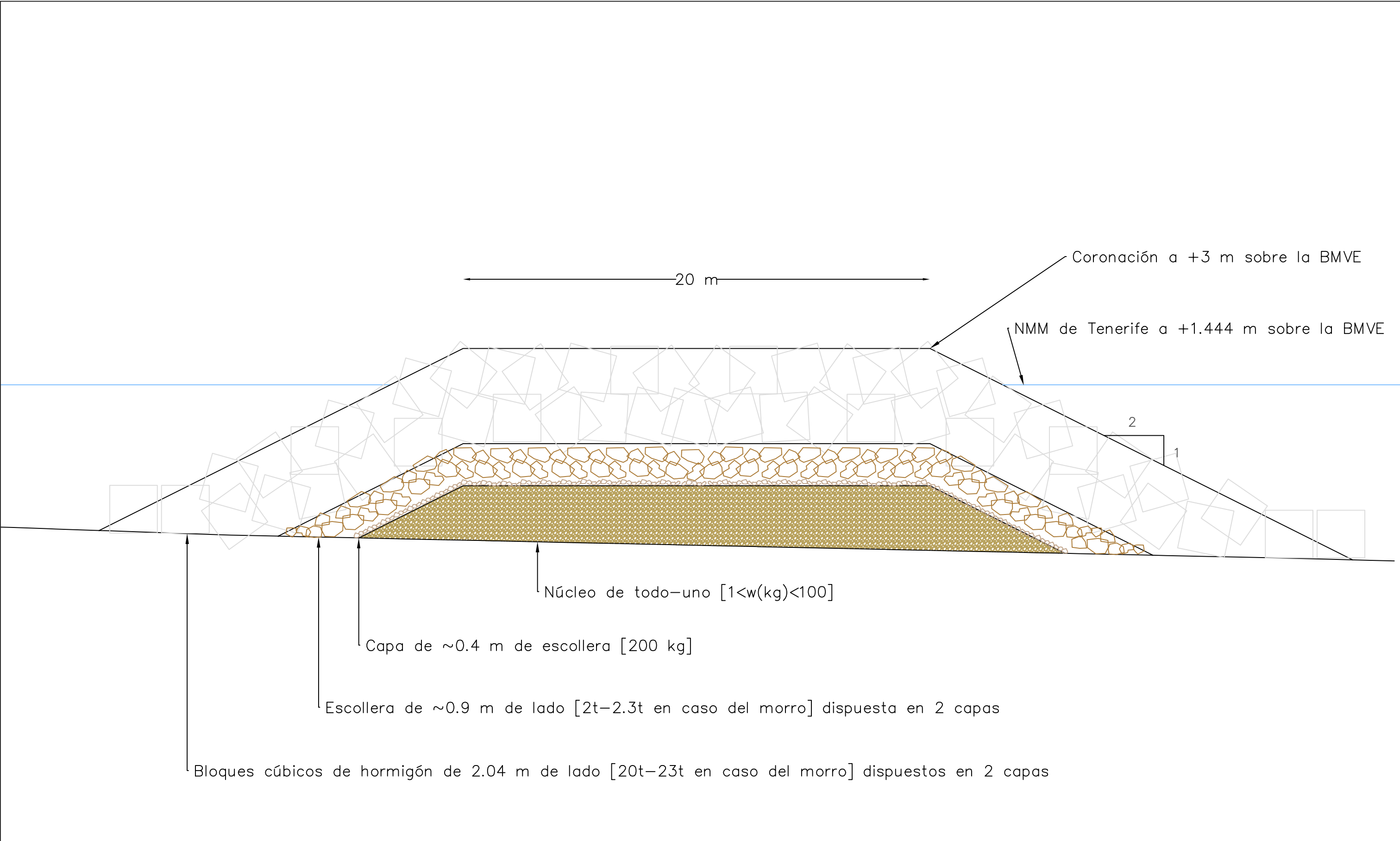
TÍTULO:
Perfiles transversales
representativos


LOCALIDAD:
San Andrés
MUNICIPIO:
Santa Cruz de Tenerife

AUTOR:
Manuel Queijeiro Rilo

ESCALA:
1:1250
FECHA:
Junio 2018

PLANO:
6




	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER	TIPO: Estudio de Hidrología	TÍTULO: Sección tipo	LOCALIDAD: San Andrés	AUTOR: Manuel Queijeiro Rilo	ESCALA: 1:150	PLANO: 7
				MUNICIPIO: Santa Cruz de Tenerife		FECHA: Junio 2018	

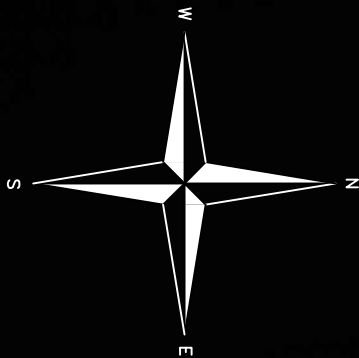



NOTA: La situación considerada representa el NMM en Tenerife (+1.444 m sobre la BMVE) y un individuo de 1 m de altura en un punto arbitrario del paseo marítimo (+4 m sobre la BMVE)

LEYENDA:

ROJO: NO VISIBLE AMARILLO: PARCIALMENTE VISIBLE VERDE: VISIBLE

	ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER	TIPO: Estudio de Hidrología	TÍTULO: Análisis de visibilidad desde el paseo marítimo	LOCALIDAD: San Andrés	AUTOR: Manuel Queijeiro Rilo	ESCALA: 1: 2500	PLANO: 8
				MUNICIPIO: Santa Cruz de Tenerife		FECHA: Junio 2018	



	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER	TIPO: Estudio de Hidrología	TÍTULO: Vista general	LOCALIDAD: San Andrés	AUTOR: Manuel Queijeiro Rilo	ESCALA: 1: 3000	PLANO: 9
				MUNICIPIO: Santa Cruz de Tenerife		FECHA: Junio 2018	

Apéndice II: Transmisividad del dique

La transmisión del oleaje a través del cuerpo del dique se evalúa mediante el parámetro K_t . Este, multiplicado por la ola incidente, proporciona el valor de la altura tras cruzar el obstáculo.

La formulación empleada surge del proyecto europeo DELOS, para estructuras de pendiente suave.

$$K_t = \left[-0.3 * \frac{R_c}{H_{m0,i}} + 0.75 * (1 - \exp(-0.5 * \xi_{op})) \right] * (\cos \beta)^{2/3}$$

Donde:

R_c : francobordo (m)

$H_{m0,i}$: altura del oleaje incidente (m)

β : ángulo de ataque de la ola relativo a la normal de la estructura.

Dada la gran casuística de oleajes que pueden incidir en el dique, se tomará la solución pésima, en la que este ángulo corresponde a 0, y por tanto maximiza la expresión.

$$s_{op}: \text{pendiente de la ola con } L_0 \text{ basado en } T_p = \frac{H_{m0}}{L_{0p}} = \frac{2\pi H_{m0}}{g T_p^2} = \frac{2\pi * 2.7}{9.81 * 9.61^2} = 0.019$$

$$\xi_{op}: \text{núm. Iribarren, basado en } s_{op}: I_{rm} = \frac{tg \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} = \frac{tg \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_{m0}}{g T_p^2}}} = \frac{0.5}{\sqrt{\frac{2\pi * 2.7}{9.81 * 9.61^2}}} = 3.62$$

Que se corresponde para rotura del tipo oscilación o colapso.

En el caso de pleamar resulta:

$$K_t = \left[-0.3 * \frac{0.15}{2.7} + 0.75 * (1 - \exp(-0.5 * 3.62)) \right] * (\cos 0)^{2/3} = 0.61$$

En el caso de bajamar resulta:

$$K_t = \left[-0.3 * \frac{3}{2.7} + 0.75 * (1 - \exp(-0.5 * 3.62)) \right] * (\cos 0)^{2/3} = 0.29$$

Apéndice III: Listado de figuras y tablas.

Listado de figuras.

Fig. 1: Localización de la comunidad de San Andrés. Imágenes recuperadas de GoogleMaps.	9
Fig. 2: Vista aérea del pueblo de San Andrés.	10
Fig. 3: Oleaje rebasando la avenida de San Andrés.	11
Fig. 4: Fases de la traslación terrestre con sus correspondientes estaciones.	23
Fig. 5: Ejemplo de oleaje y corrientes marinas. Captura recuperada de earth.nullschool.net....	27
Fig. 6: Batimetría de la zona en cuestión.	28
Fig. 7: Marco general para la obtención de bases de datos de oleaje.....	30
Fig. 8: Comparación entre marea astronómica y meteorológica.....	32
Fig. 9: Combinación de ambas mareas sobre la bajamar máxima viva equinoccial.	32
Fig. 10: Histograma de altura de ola significativa vs periodo de pico para el régimen medio....	33
Fig. 11: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma para régimen medio..	34
Fig. 12: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en invierno.	35
Fig. 13: Histograma de altura de ola significativa vs período de pico en invierno	36
Fig. 14: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en primavera.	37
Fig. 15: Histograma de altura de ola significativa vs período de pico en primavera.....	37
Fig. 16: Rosa de oleaje y Tabla de parámetros estadísticos de la misma en verano.	38
Fig. 17: Histograma de altura de ola significativa vs período de pico en verano.	39
Fig. 18: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Enero 1999.....	43
Fig. 19: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Julio 2007.....	44
Fig. 20: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Diciembre 2010	45
Fig. 21: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Agosto 2011.....	46
Fig. 22: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Febrero 2012.	47
Fig. 23: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Junio 2012.	48
Fig. 24: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Junio 2014.	49
Fig. 25: Caracterización temporal, estadística y direccional del evento. Agosto 2014.....	50
Fig. 26: Flujo de trabajo simplificado de Celeris.....	58
Fig. 27: Coordenadas UTM de la costa de San Andrés.....	59
Fig. 28: Malla y puntos de toma de datos definidos para el estudio.	60
Fig. 29: Pantallazo de la simulación de Agosto de 2011. Inundaciones en violeta.....	63
Fig. 30: Vista en planta de la Alternativa 1.....	69
Fig. 31: Ejemplos visuales de oleajes sur y este en Celeris. Alternativa 1.....	69
Fig. 32: Vista en planta de la Alternativa 2.....	70
Fig. 33: Ejemplos visuales de oleajes sur y este en Celeris. Alternativa 2.....	70
Fig. 34: Vista en planta de la Alternativa 3.....	71
Fig. 35: Ejemplos visuales de familias A y B en Celeris. Alternativa 3.	71
Fig. 36: Comparación de rebases antes y después de la alternativa (Apéndice VII).....	72
Fig. 37: Ejemplos de cálculo volumétrico a partir de dos superficies en Civil3D.	77
Fig. 38: Simulaciones de la solución final ante las familias A y B.	79
Fig. 39: Máximos anuales de altura de ola significativa.	85
Fig. 40: Altura de ola significativa asociada al periodo de retorno	86
Fig. 41: Alturas de mareas y estructuras.	87
Fig. 42: Obtención del estado de mar de cálculo.	88
Fig. 43: Valores de S para Inicio de Avería en los distintos sectores de diques rebasables.....	91

Listado de tablas.

Tabla 1: Armónicos principales de la marea astronómica	25
Tabla 2: Principales datos asociados a la posición Sol-Tierra-Luna en las inundaciones.....	25
Tabla 3: Parámetros asociados a la marea astronómica en los eventos de inundación.	42
Tabla 4: Recopilatorio de las variables principales en los eventos de inundación.	51
Tabla 5: Porcentaje de ocurrencia de cada familia según la estación del año.	52
Tabla 6: Competencias de los principales tipos de modelos numéricos.....	57
Tabla 7: Coordenadas UTM de los puntos de muestreo definidos.....	60
Tabla 8: Evaluaciones parciales de las 3 alternativas.....	77
Tabla 9: Máxima probabilidad conjunta en la vida útil para los E.L.U. ROM 0.0-01.....	83
Tabla 10: Correlaciones entre parámetros de temporales para Tenerife (ROM 0.3-91).....	87
Tabla 11: Rotura de olas por fondo en el mar de cálculo para bajamar y pleamar.....	89
Tabla 12: Dimensiones definitivas de los bloques del manto principal.	98
Tabla 13: Dimensiones definitivas de la escollera del primer manto secundario.	99

Apéndice IV: Referencias.

Bibliografía empleada.

ABRAMSON, G. 2010. *Calculadora de Superlunas y Minilunas*. Consulta [3-1-2018]. Disponible en: <http://guillermoabramson.blogspot.com.es/p/la-luna.html>

AYALA, F.J.; OLCINA, J.; VILAPLANA, J.M. 2004. *Impacto social y económico de los riesgos naturales en España en el periodo 1990-2000*. Revista Gerencia de Riesgos y Seguros (Fundación Mapfre), 85, 17-29. [Consulta 03-03-2018]. Disponible en: <http://www.mapfre.com>

CAMUS, P. [et al]. 2012. *High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas*.

FRANCO GARCÍA, A. 2016. *Análisis armónico de las mareas*. [Consulta 27-12-2017]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/mareas/mareas_1.html

GARRO, R. 2012. *Mareas – Tipos de mareas*. [Consulta 27-12-2017]. Disponible en: <http://www.paranauticos.com/Notas/Tecnicas/Mareas/tipos-mareas.htm>

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I.; AYALA, F.; ELIZAGA M. 1988. *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. IGME, Madrid, 111 pp.

JALÓN ROJAS, I. 2013. *Análisis de armónicos de marea astronómica con t_{tide}*. [Consulta 28-12-2017]. Disponible en: https://fluyendolibremente.wordpress.com/2013/01/11/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t_tide/

JUNKE, G. 2002. *Simple and explicit solution of wave dispersion equation*. Coastal Engineering, Volume 45, Issue 2, 2002, Pages 71-74, ISSN 0378-3839. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00039-X).

KOPP, E. R. [et al.]. 2016. *Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era*. National Academy of Sciences, USA. ISSN: 1091-6490 . Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1517056113>

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIOAMBIENTE. 2012. *Cambio Climático en la Costa de España. Apéndice I: Bases de datos del proyecto C3E*. [Consulta 17-1-2018]. Disponible en: http://www.aguasgomera.es/descargas/PLANES_RIESGO_INUNDACION/CD2/03_PARTE_II_MAPAS_ARPSIS_COSTERAS/01_MEMORIAGENERAL/28-5149_Anejol_DatosC3E.pdf

SEISDEDOS, J. [et al.]. 2013. *Estudio y cartografía de los peligros naturales costeros de la región de Murcia*. Boletín Geológico y Minero, 124 (3): 505-520 ISSN: 0366-0176

STRAUSS, B. H. [et al.]. 2016. *Unnatural Coastal Floods: Sea Level Rise and the Human Fingerprint on U.S. Floods Since 1950*. Climate Central Research Report, pp. 1-16. [Consulta 04-03-2018]. Disponible en: <http://sealevel.climatecentral.org/uploads/research/Unnatural-Coastal-Floods-2016.pdf>

TAVAKKOL, S.; PATRICK L. 2016. *Celeris: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization*. Computer Physics Communications 217 (2017): 117-127.

TUTIEMPO.NET [sitio web]. *Horas sol y luna en Santa Cruz de Tenerife*. [Consulta 3-1-2018]. Disponible en: <https://www.tutiempo.net/santa-cruz-de-tenerife.html?datos=calendario#cal>

VAN DER MEER, J.W. [et al.]. 2016. EurOtop. *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Disponible en: www.overtopping-manual.com.

VYZIKAS, T. [et al.]. 2014. *Application of numerical models and codes*. Task 3.4.4 MERiFIC Project. University of Plymouth.

Sin olvidar, por supuesto, todo el material proporcionado en los cursos de Coastal Engineering (G1156) y Obras Marítimas (G1146) del grado en Ingeniería Civil de la Universidad de Cantabria.

Eventos de inundación. Orden cronológico.

Canarias7. (4 de julio de 2007). *El oleaje vuelve a destrozar el frente marítimo de San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: https://www.canarias7.es/hemeroteca/el_oleaje_vuelve_a_destrozar_el_frente_maritimo_de_san_andres-PHCSN59503

Antena 3 Canarias. (23 de diciembre de 2010). *Consecuencias del oleaje en San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: http://www.antena3.com/canarias/noticias/medioambiente/consecuencias-oleaje-san-andres_2010122300159.html

La opinión de Tenerife. (30 de agosto de 2011). *Las olas golpean de nuevo a San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: <http://www.laopinion.es/tenerife/2011/08/30/olas-golpean-nuevo-san-andres/365357.html>

PÉREZ, N. (18 de noviembre de 2011). *‘Si hay un temporal de mar de componente este-sureste, San Andrés lo sentirá’*. La opinión de Tenerife [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: <http://www.laopinion.es/tenerife/2011/11/18/hay-temporal-mar-componente-sureste-san-andres-sentira/369066.html>

Cierre de la carretera de San Andrés. (6 de febrero de 2012). El Día, p. 5

Canarias Ahora. (18 de junio de 2012). *El oleaje 'tumba' el nuevo muro de San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: https://www.eldiario.es/canariasahora/politica/oleaje-tumba-nuevo-San-Andres_0_16798434.html

Canarias Ahora. (13 de noviembre de 2012). *Una playa doble para evitar el oleaje en San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: https://www.eldiario.es/canariasahora/politica/doble-evitar-oleaje-San-Andres_0_68593957.html

La opinión de Tenerife. (2 de junio de 2014). *Oleaje en San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: <http://www.laopinion.es/multimedia/videos/tenerife/santa-cruz/2014-06-02-37554-oleaje-san-andres-junio-2014.html>

El oleaje vuelve a golpear San Andrés (2 de junio de 2014). El Día. p 1, p 15.

Canarias Ahora. (27 de agosto de 2014). *El oleaje causa estragos en Canarias* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: https://www.eldiario.es/canariasahora/sociedad/Oleaje_0_296770944.html

El Día. (18 de septiembre de 2014). *Sacyr hará el dique de San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: <https://eldia.es/tenerife/2014-09-18/11-Sacyr-hara-dique-San-Andres.htm>

La opinión de Tenerife. (20 de octubre de 2015). *El fuerte oleaje se lleva 60 metros del dique semisumergido de San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: <http://www.laopinion.es/tenerife/2015/10/20/fuerte-oleaje-lleva-60-metros/634284.html>

La opinión de Tenerife. (19 de mayo de 2016). *Concluye la obra del dique semisumergido de San Andrés* [fecha de consulta: 22 Marzo 2018]. Disponible en: <http://www.laopinion.es/tenerife/2016/05/19/autoridad-portuaria-concluye-obra-dique/676212.html>

Apéndice V: Scripts de Matlab. (*.m)

➤ Parámetros básicos en el intervalo de tiempo indicado

```
clear all
close all
clc

%% encuentra fechas
ruta='C:\Users\Manu\Documents\UNIVERSIDAD4\TFG\DocumentosMatlab\';
load([ruta,'MA_TENERIFE_1948_2015.mat'])
load([ruta,'dow.mat'])
load([ruta,'GOS_1948_2014'])

t=eje_tiempo(1:582168);
MA=MA(1:582168);
SS=datai.zeta;
Hs=dow_norte.hs(1:582168);

NM=MA+SS;
NM=NM+abs(min(NM));
NMmax=max(NM)
NMmin=min(NM)

%% identifico una ventana temporal
tv=datevec(t);
tini=datenum(2014,8,24,0,0,0);
tfin=datenum(2014,8,30,0,0,0);
s=find(t>=tini & t<=tfin);
ti=t(s);

%NIVEL DEL MAR
NMi=NM(s);
maxevento=max(NMi)
minevento=min(NMi)
posicionmax=find(NM==max(NMi));
posicionmin=find(NM==min(NMi));
tiempomax=datevec(t(posicionmax))
tiempomin=datevec(t(posicionmin))
CM=max(NMi)-min(NMi);
Hs(posicionmax)

%ALTURA SIGNIFICANTE
Hsi=(Hs(s));
maxHsevento=max(Hsi)
minHsevento=min(Hsi)
posicionHsmax=find(Hs==max(Hsi));
posicionHsmin=find(Hs==min(Hsi));
tiempoHsmax=datevec(t(posicionHsmax))
tiempoHsmin=datevec(t(posicionHsmin))

%DIRECCIONES
Diri=dow_norte.wave_dir(s);
maxDirevento=max(Diri)
minDirevento=min(Diri)
posicionDirmax=find(dow_norte.wave_dir==max(Diri));
posicionDirmin=find(dow_norte.wave_dir==min(Diri));
tiempoDirmax=datevec(t(posicionDirmax))
tiempoDirmin=datevec(t(posicionDirmin))

%PERIODOS
tpi=dow_norte.tp(s);
maxPerevento=max(tpi)
minPerevento=min(tpi)
posicionPermax=find(dow_norte.tp==max(tpi));
posicionPermin=find(dow_norte.tp==min(tpi));
tiempoPermax=datevec(t(posicionPermax))
tiempoPermin=datevec(t(posicionPermin))
```

➤ **Elaborar gráficos en función del tiempo para un determinado evento**

```
clear all
close all
clc

ruta='C:\Users\Manu\Documents\UNIVERSIDAD4\TFG\DocumentosMatlab\';
load([ruta,'MA_TENERIFE_1948_2015.mat'])
load([ruta,'dow.mat'])
load([ruta,'GOS_1948_2014'])

t=eje_tiempo(1:582168);
MA=MA(1:582168);
SS=datai.zeta;
Hs=dow_norte.hs(1:582168);

t=dow_norte.time;
hs=dow_norte.hs;
dir=dow_norte.wave_dir;
tp=dow_norte.tp;

%% identifico una ventana temporal
tv=datevec(t);
tini=datenum(2011,8,26,0,0,0);
tfin=datenum(2011,9,1,0,0,0);
s=find(t>=tini & t<=tfin);
ti=(t(s));

%Pintar nivel del mar en dicha ventana temporal
NM=MA+SS;
NM=NM+abs(min(NM));
NMi=NM(s);
subplot(4,1,1)
plot(ti,NMi,'.');
datetick('x','dd-mmm HHAM','keepticks')
title('Nivel del mar en el evento. Año 2011')
xlabel('Fecha') % x-axis label
ylabel('Metros') % y-axis label
axis tight
hold on

%Pintar altura significativa versus tiempo en dicha ventana temporal
hsi=hs(s);
subplot(4,1,2)
plot(ti,hsi,'m. ');
datetick('x','dd-mmm HHAM','keepticks')
title('Altura de ola significativa.')
xlabel('Fecha') % x-axis label
ylabel('Metros') % y-axis label
axis tight

%Pintar direcciones en dicha ventana temporal
diri=dir(s);
subplot(4,1,3)
plot(ti,diri,'r. ');
datetick('x','dd-mmm HHAM','keepticks')
title('Dirección del oleaje')
xlabel('Fecha') % x-axis label
ylabel('Grados') % y-axis label, siendo 0° el Norte
axis tight

%Pintar periodo pico en dicha ventana temporal
tpi=tp(s);
subplot(4,1,4)
plot(ti,tpi,'g. ');
datetick('x','dd-mmm HHAM','keepticks')
title('Período pico del oleaje')
xlabel('Fecha') % x-axis label
ylabel('Segundos') % y-axis label
axis tight

print(gcf,'-djpeg','-r500','Agosto2011')
```

➤ **Elaboración de la rosa, histograma y tablas estadísticas: DIBUJA_ROSA.m**

```
clear all
close all
clc

addpath([pwd, '\dependencias\'])

%% programa de la rosa
path_o=[pwd];
mkdir([path_o, '\graficos_ROSAS\']);

load('dow.mat');
Hs=dow_norte.hs;
Tp=dow_norte.tp;
Dir=dow_norte.wave_dir;
N=' ';
t=dow_norte.time;

%Ejemplo con Agosto 2011, o bien con estaciones del año
tini=datenum(2011,8,26,0,0,0);
tfin=datenum(2011,9,1,0,0,0);
s=find(t>=tini & t<=tfin);
ti=t(s);
Hsi=Hs(s);
Diri=Dir(s);
Tpi=Tp(s);

rosa_carol(Hsi,Diri,N,path_o);

%% Histograma Hs vs. Tp
mkdir([path_o, '\graficos_HISTOGRAMA\']);
f1=figure;
set(f1,'name',['Histograma Hs vs. Tp en Agosto de 2011',num2str(N)],'NumberTitle','off')
DD=Diri;
HH=Hsi;
TT=Tpi;
%TT=data.tm;
DD(find(HH==0))=[];
TT(find(HH==0))=[];
HH(find(HH==0))=[];
D = [HH,TT] ;
X = linspace(0,max(HH),100)' ;
Y = linspace(0,max(TT),90)' ;
P=hist3(D, {X Y})./sum(sum(hist3(D, {X Y})));
P(find(P==0))=NaN;
pcolor(X,Y,P')
colormap(jet)
shading interp
xlabel('Hs (m)')
ylabel('Tp (s)')
set(gca,'fontSize',8)
grid on
title(['Histograma - Evento de Agosto de 2011 ',num2str(N)])
I = getframe(gcf);
print(gcf, '-dpng', '-r300', '-painters', [path_o, '\graficos_HISTOGRAMA\HISTOGRAMA_2011Ago_',num2str(N)])
```

➤ Dependencias de la función anterior: GROSeq.m

```
function [ff,fmax] = GROSeq(az, nb, typ, fscale,col,total,fmax);
% ff = groseq2(az, nb, typ, fscale,levels)
% This is a replacement of MATLAB's rose
% for those in the geophysical sciences.
% It draws a rose diagram of the azimuths (in degrees)
% in the vector az, after classifying them into
% nb classes. typ is set to 1 (the default value)
% for 360 degree data, or 2 for 180 degree data.
% set fscale = 0 for arithmetic, 1 for square root
% scale for frequency.
% This version uses a modified version of centaxes
% (centax2) to plot a central scale: to turn this
% off, comment out the call to centax2. The
% scale shown is the frequency, or the square root
% of the frequency, depending on fscale.
% Written by Gerry Middleton, December 1996
%
%Modified by Omar Quetzalcoatl Gtz, June, 2006
% to draw the histogram in bars, get the values of the bars, etc...

if typ == 2 % double, then divide by 2 if necessary
    k = find(az > 179.99);
    az(k) = az(k) - 180; % corrected az
    az2 = [az;(az+180)]; % extended az
end
x = [-11.25:360/nb:360-11.25];
x2 = [180/nb:360/nb:(360 - 180/nb)]; % class limits
if typ == 1
    [f,xk] = histc(az,x); % draw histogram
    f=f';
    % stairs(x, [f 0]);
else
    xx = [0:360/nb:180]; % change x scale
    x3 = [180/nb:360/nb:180-180/nb]; % frequencies for histogram
    [f,x3] = histc(az,x3); % draw histogram
    % stairs(xx, [f 0]);
    [f, x2] = histc(az2, x2); % frequencies for rose
end
f=round(f./total*10000)./100;
ftot = sum(f); % find total frequency
if typ == 2
    ftot = ftot/2; % modify if 180 data
end
if nargin<7,
    fmax = ceil(max(f)); % set up axes for histogram
    re=rem(fmax,5);
    fmax=fmax-re+5;
end
if typ == 1
    axis([0 360 0 (fmax+1)]);
else
    axis([0 180 0 (fmax+1)]);
end
set(gca, 'XTick',x);
% begin new figure for rose
ff = f;
if fscale == 1 % scale frequency by maximum
    f = sqrt(f);
    fmax = max(f);
    f0 = fmax/1000; %10
else
    f0 = fmax/1000; %10
end
xt = [-fmax:fmax/4:fmax];
yt = xt;
% plot axes
p = plot([-fmax,-f0],[0,0], 'r', [f0 fmax], [0, 0], 'r',...
    [0,0],[-fmax,-f0], 'r', [0 0], [f0,fmax], 'r');
axis([-fmax fmax -fmax fmax]);
centaxes;
axis('square');
axis('off');
hold on
```

```

[rs,rc]=ARCq(f0,0,360);
fill(rs,rc,'k');

rs10 = f0*sin(pi*x(1:nb)/180); % draw radial lines
rc10 = f0*cos(pi*x(1:nb)/180);
rs1 = f(1:nb) .* sin(pi*x(1:nb)/180);
rc1 = f(1:nb) .* cos(pi*x(1:nb)/180);
rs20 = f0*sin(pi*x(2:nb+1)/180);
rc20 = f0*cos(pi*x(2:nb+1)/180);
rs2 = f(1:nb) .* sin(pi*x(2:nb+1)/180);
rc2 = f(1:nb) .* cos(pi*x(2:nb+1)/180);
RS=[]; RC=[];
for i = 1:nb % draw arcs
    [rs,rc]=ARCq(f(i), x(i), x(i+1));
    rct=[rs10(i),rs1(i),rs,rs2(i),rs20(i)];
    rst=[rc10(i),rc1(i),rc,rc2(i),rc20(i)];
    RS=[RS ;rct];
    RC=[RC ;rst];
end
hf=fill(RS',RC',col);
set(hf,'facealpha',1,'edgecolor','k','linewidth',1)

k = find(f > 0);

for hj=[2,5,10:5:(fmax-5)],
    [rc,rs]=ARC2(hj, 0, 360);
    plot(rs, rc,'k--')
    hold on;
    text(.5,hj,[num2str(hj),'%'],'fontsize',12,'fontweight','bold');
    text(-1.5,-hj,[num2str(hj),'%'],'fontsize',12,'fontweight','bold');
end

[rc,rs]=ARC2(fmax, 0, 360);
plot(rs, rc,'-k','LineWidth',1.5)

```

➤ Dependencias de la función anterior: Tabla.m

```

function tabla (Y,Ydir,titulo,I)

n=length(Ydir);

p12=(1-12/8760)*100;
for j=1:16,
    izq=(j-1.5)*22.5;
    der=(j+0.5)*22.5;
    dum=find((Ydir>=izq)&(Ydir<der));
    H=Y(dum);
    if isempty(H)
        prob(j)=0;
        H50(j)=0;
        H90(j)=0;
        H99(j)=0;
        H12(j)=0;
    else
        prob(j)=length(H)/n;
        H50(j)=prctile(H,50);
        H90(j)=prctile(H,90);
        H99(j)=prctile(H,99);
        H12(j)=prctile(H,p12);
    end
end

dires=['N ','NNE','NE ','ENE','E ','ESE','SE ','SSE','S ','SSW','SW ','WSW','W ','WNW','NW ','NNW'];

f3=figure;
set(f3,'name',['Tabla estadísticos básicos - Pto. ',num2str(I)],'NumberTitle','off')

text(0.05,0.90,'TABLA ESTADÍSTICOS BÁSICOS','fontSize',9,'Color',[1 0 0]);
text(0.05,0.80, strcat('Variable medida: ',titulo),'fontSize',9);

%direcciones

```

```

text(0.05,0.70,'direcciones(^)','fontsize',8);
posi=0.7;
for i=1:length(dires)
    posi=posi-0.1;
    text(0.1,posi,dires(i,:));
end

%probabilidad direcciones
text(0.3,0.70,'prob.direccion','fontsize',8);
posi=0.7;
for i=1:length(prob)
    posi=posi-0.1;
    text(0.3,posi,num2str(sprintf('%1.4f',prob(i))));
end

% X_50%
text(0.55,0.70, strcat(titulo, '_{50%}'),'fontsize',8);
posi=0.7;
for i=1:length(prob)
    posi=posi-0.1;
    text(0.55,posi,num2str(sprintf('%1.4f',H50(i))));
end

% X_90%
text(0.75,0.70, strcat(titulo, '_{90%}'),'fontsize',8);
posi=0.7;
for i=1:length(prob)
    posi=posi-0.1;
    text(0.75,posi,num2str(sprintf('%1.4f',H90(i))));
end

% X_99%
text(0.95,0.70, strcat(titulo, '_{99%}'),'fontsize',8);
posi=0.7;
for i=1:length(prob)
    posi=posi-0.1;
    text(0.95,posi,num2str(sprintf('%1.4f',H99(i))));
end

% X_s12%
text(1.15,0.70, strcat(titulo, '_{12}'),'fontsize',8);
posi=0.7;
for i=1:length(prob)
    posi=posi-0.1;
    text(1.15,posi,num2str(sprintf('%1.4f',H12(i))));
end

axis([0 1.2 -1 1])
axis off

```

➤ Dependencias de la función anterior : rosa_carol.m

```

function rosa_carol(Y,YDir,I,pathmat)

titulo=['Hs',num2str(I)];

Y25=prctile(Y,25);
dum25=find(Y(:)<=Y25);
Ydir25=YDir(dum25);

Y50=prctile(Y,50);
dum50=find(Y(:)<=Y50);
Ydir50=YDir(dum50);

Y75=prctile(Y,75);
dum75=find(Y(:)<=Y75);
Ydir75=YDir(dum75);
Y100=max(Y);

colorin=[0 0 0.4; 0 0 0.55; 0 0 0.7;0 0.5 0.98];

f2=figure(100)

```

```

set(f2,'name',['Rosa de oleaje del evento de Agosto de 2011',num2str(I)], 'NumberTitle','on')

axes('position',[0 0.1 0.8 0.8]); %genero un eje para el dibujo
[ff,fmax]=GROSEq(YDir,16,1,0,colorin(1,:),length(YDir));
hold on;
GROSEq(Ydir75,16,1,0,colorin(2,:),length(YDir),fmax);
GROSEq(Ydir50,16,1,0,colorin(3,:),length(YDir),fmax);
GROSEq(Ydir25,16,1,0,colorin(4,:),length(YDir),fmax);

hbar=axes('position',[.85 .1 .03 .8]); %genero un eje para hacer la barra
colormap(flipud(colorin));%le digo que colores debe de llevar
caxis([0 4]) %limito los ejes
hc=colorbar(hbar); % dibujo la barra en los ejes correspondientes
set(hc,'ytick',[2:1:4],'yticklabel',{'25% ','50% ','75% '}) % pongo ticks y leyendas

xlabel(['Quartiles de ',titulo, ' en evento de Agosto 2011'])% leyenda en el eje x

print(gcf,'-dpng','-r300',[pathmat,'\graficos_ROSAS\ROSA_2011Ago_',num2str(I)])

tabla(Y,YDir,titulo,I)

print(gcf,'-dpng','r300',[pathmat,'\graficos_ROSAS\TABLA_ROSA_2011Ago_',num2str(I)])

```

➤ Porcentaje temporal que cumplen las familias de oleaje

```

ruta='C:\Users\Manu\Documents\UNIVERSIDAD4\TFG\DocumentosMatlab\';
load([ruta,'MA_TENERIFE_1948_2015.mat'])
load([ruta,'dow.mat'])
load([ruta,'GOS_1948_2014'])

t=eje_tiempo(1:582168);
MA=MA(1:582168);
SS=datai.zeta;
Hs=dow_norte.hs(1:582168);
Dir=dow_norte.wave_dir(1:582168);
Tp=dow_norte.tp(1:582168);

NM=MA+SS;
NM=NM+abs(min(NM));

%% identifico una ventana temporal, en este caso de inviernos

tini=datenum(1948,12,23,0,0,0);
tfin=datenum(1949,3,21,0,0,0);
s=find(dow_norte.time>=tini & dow_norte.time<=tfin);
invierno=length(s);
Anhos=65; %años de datos registrados
Pos=invierno*Anhos;

S(1:Pos,1)=zeros; %contendrá todos los días
w=1;v=1;

for j=1:Anhos

for i=1:invierno
S(w)=s(v);
w=w+1;
v=v+1;
end

tini= addtodate(tini, 1, 'year');
tfin= addtodate(tfin, 1, 'year');
s=find(dow_norte.time>=tini & dow_norte.time<=tfin);
v=1;
end

```



```

ti=t(S);
Hsi=Hs(S);
Diri=Dir(S);
Tpi=Tp(S);
NMI=NM(S);

% Familia A
%posiciones=find(NMi>2 & Hsi<1 & Hsi>0.5 & Tpi>10 & Tpi<18 & Diri>140 & Diri<190);
% Familia B
posiciones=find(NMi>2 & Hsi<2 & Hsi>1 & Tpi>6 & Tpi<13 & Diri>90 & Diri<140);

length(t)%serie histórica, o usando ti para referir a los inviernos en concreto
length(posiciones)
ocurrencia=length(posiciones)/length(t)*100 %"

```

➤ Convertir un archivo ENZ.dat (tabulación como separador) en UTM a archivo .cbf

```

clear all
close all
clc

ruta=[pwd, '\'];

A=load([ruta, 'BATI_TODO_ORIGINAL_small.dat']); %Se encuentra en la misma carpeta
MAREA=0; %Esta referenciado con respecto a la BMVE. Batimetría positiva, Cotas
negativas. Añadir lo que sea necesario
nombre='SANANDRES.cbf';

X=A(:,1);
Y=A(:,2);
Z=A(:,3);

% NOTA: esto define la resolución del tanque de olas y por lo tanto la calidad de los
resultados y su esfuerzo computacional.
Dx=10; % resolución malla en X (m)
Dy=10; % resolución malla en Y (m)

% proyecto los XYZ en una malla regular predefinida
Xmin=min(X);
Ymin=min(Y);
Xmax=max(X);
Ymax=max(Y);

[xx,yy]=meshgrid(Xmin:Dx:Xmax,Ymin:Dy:Ymax);

C2=griddata(X,Y,Z,xx,yy); % proyectar (interpolando) tus datos originales 3D a tu malla
xx yy
s=find(C2<-30); % truncamiento de la montaña en el caso de San Andrés
C2(s)=-30;

%OJO sumo la marea que deseo ejecutar
C2=C2+MAREA;

figure(1)
pcolor(xx,yy,-C2);
shading interp
colorbar
axis equal
title('Batimetría en metros')
print(gcf, '-dpng', '-r300', 'BATI_UTM_CELERIS_bati')
% Nota: La batimetría debe empezar en 0,0 (esq. inf. izq.)

%% escribo batimetría para el CELERIS
nx=size(C2,2);
ny=size(C2,1);
write_bathy (nombre,nx,ny,-C2')

Lx=max(xx(:))-min(xx(:));
Ly=max(yy(:))-min(yy(:));

```

```

disp(['<fieldDimensions width = ', num2str(Lx), ' length =', num2str(Ly), '
stillWaterElevation = 0></fieldDimensions>']);
disp(['<gridSize nx = ', num2str(nx), ' ny = ', num2str(ny), '></gridSize>']);
disp(['<bathymetryFilePath> ', nombre, ' </bathymetryFilePath>']);

%% Puntos de control
%Nota: los puntos de control en el CELERIS deben estar referidos con respecto a la malla
[i,j] --> (no en metros)
P=load(['puntos_UTM.txt']);
figure(2)
pcolor(C2);
shading interp
colormap(flipud(bone))
hold on
P2(:,1)=(P(:,1)-min(xx(:)))/Dx;
P2(:,2)=(P(:,2)-min(yy(:)))/Dy;
%axis equal
for i=1:length(P)
    plot3(P2(i,1),P2(i,2),10,'c.','markersize',10)

    E=text(P2(i,1),P2(i,2),10,[' P-', num2str(i)]);
    set(E,'color','r')
end
hold off
axis equal
save puntos.txt P2 -ascii
title('Batimetría en malla')

print(gcf, '-dpng', '-r300', 'BATI_IJ_CELERIS_bati')

disp(' ')
disp(' ')
for i=1:size(P2,1)
    if i<size(P2,1)
        disp([' ', num2str(round(P2(i,1))), ', ', num2str(round(P2(i,2))), ', '])
    else
        disp([' ', num2str(round(P2(i,1))), ', ', num2str(round(P2(i,2)))])
    end
end
end

```

➤ Programa para generar el forzamiento espectral de celeris:

```

clear all
close all
clc
addpath([pwd, '\dependencias\'])

Hs1=0.5;
Tp=8.0;
Dir_m=90; %este es el ángulo "CELERIS" que debe concordar con el lado del contorno por
donde se dirige el oleaje N, S, E u W
Gamma=5.0;
PathGuardar=[pwd, '\']
codigo='gabo';
fecha=datestr(now);
proy=1;

Espectros_SWAN_1_Granadilla([0,0],Hs1',Tp',Dir_m',Gamma,PathGuardar,codigo,fecha,proy);
[F1,D1,MMM]=P0_OP_Integra_espectros(PathGuardar,[codigo, '_sp.spc']);

df=diff(F1(:,1));
df(end+1)=df(end);
da=abs(diff(D1(1,:)).*pi/180);
da(end+1)=da(end);
sf=df./2;
sd=da(1)./2*180/pi; % en grados
ff=F1;
dd=D1; % en grados

[FF1,DD1]=meshgrid(df,da);
FF1=FF1';
DD1=DD1'.*180./pi;

```

```

MMMi=squeeze(MMM(:, :, 1));
MMMi=(MMMi.*180./pi).*(FF1.*(DD1.*pi./180));

ZZ=sqrt(2.*MMMi); % cambio la energía de sup. libre por amplitud

amp=reshape(ZZ,prod(size(ZZ)),1);
T=reshape(1./F1,prod(size(F1)),1);
dir=reshape(D1,prod(size(D1)),1).*pi./180;
b=rand(size(T,1),1).*2.*pi;

s=find(dir>=180);
dir(s)=dir(s)-360;

s=find(amp<=max(amp).*0.2);
RES=[amp, T, dir, b];
RES(s,:)=[];

fid=fopen('IrrWaves.txt','w');
fprintf(fid,'%s \n', '');
fprintf(fid,'%s \n', [' [NumberOfWaves] ', num2str(size(RES,1))]);
fprintf(fid,'%s \n', [' =====']);
fprintf(fid,'%f %f %f %f \n', RES);

fclose all

%% dibujo
surf(F1,D1,ZZ)

```

➤ Archivo para la extracción de datos en boyas de Celeris:

```

clear all
close all
clc

copyfile('gauges.txt','temp.txt')
A=load('temp.txt');
delete('temp.txt')
% identifica cuantos sensores existen
ini=A(1,1);
ini2=A(1,2);
s=find(A(:,1)==ini & A(:,2)==ini2);
n=s(2)-1;
disp(['Número de sensores: ', num2str(n)]);

% NOTA: borrar el fichero de los puntos cada nueva ejecución

Dt=0.02; % del fichero CML
cada=20; % del fichero CML

for i=1:n
    if i==1
        k=0;
        %close all
        W1=figure(1);
        set(W1,'PaperPosition',[0.634517 6.34517 20.984 29.6774],'visible','on') %la
        figura se grabará con tamaño A4
    elseif i==6
        k=5;
        %close all
        W2=figure(2);
        set(W2,'PaperPosition',[0.634517 6.34517 20.984 29.6774],'visible','on') %la
        figura se grabará con tamaño A4
    elseif i==11
        k=10;
        %close all
        W3=figure(3);
        set(W3,'PaperPosition',[0.634517 6.34517 20.984 29.6774],'visible','on') %la
        figura se grabará con tamaño A4
    elseif i==16

```

```

        k=15;
        %close all
        W4=figure(4);
        set(W4,'PaperPosition',[0.634517 6.34517 20.984 29.6774],'visible','on') %la
figura se grabará con tamaño A4
    end

    j=(1:n:size(A,1))+(i-1);
    p=A(j,:);
    t=(0:Dt:(length(p)-1).*Dt).*cada;
    subplot(5,1,i-k)
    plot(t,p(:,3),'.-')
    title(['Point ',num2str(i)])
    grid on
    xlabel('\eta (m)')
    ylabel('t (s)')
    set(gca,'fontsize',6)
    axis([0 max(t) -inf inf])

    if i<6
        print(W1,'-dpng','-r300',['FreeSurface_+2m_',num2str(k)])
    else
        print(W2,'-dpng','-r300',['FreeSurface_+2m_',num2str(k)])
    end
end

end

```

Apéndice VI: Scripts de Celeris. (*.cml)

Siguen todos la misma tipología, explicada en la sección 3.2.4.

```
<?xml version="1.0" ?>
<Experiment>

    <name>GPA</name>

    <!-- Settings for Model -->
    <model type = "BSNQ">
        <parameters epsilon = 0.001 Theta = 2.0 correctionStepsNum = 0 timestep =
0.01></parameters>
        <friction type = "Mannings" coef = 0.00></friction>
    </model>

    <!-- Settings for Solution field -->
    <fieldDimensions width = 1230 length =1518 stillWaterElevation = 0></fieldDimensions>
    <gridSize nx = 411 ny = 507></gridSize>
    <bathymetryFilePath> SANANDRES.cbf </bathymetryFilePath>

    <!-- Settings for Initial Condition -->
    <!--solitaryWave H = 0.058 theta = 0 xc = 5 yc = 15></solitaryWave-->

    <!-- Settings for Boundaries-->

    <eastBoundary type = "IrregularWaves" seaLevel = 0 widthNum = 2><filePath>
irrWaves.txt </filePath></eastBoundary>
    <westBoundary type = "Sponge" seaLevel = 0 widthNum = 5></westBoundary>
    <northBoundary type = "Sponge" seaLevel = 0 widthNum = 5></northBoundary>
    <southBoundary type = "Sponge" seaLevel = 0 widthNum = 5></southBoundary>

    <!-- Settings for Logging Data-->
    <logData doLog = true logStep = 20>
        <logPath>C:\Users\Manu\Documents\UNIVERSIDAD4\TFG\Celeris\SANANDRES\TEST-
2\log</logPath>

        <range filename = "surface">
            <bottomLeft x = 172 y = 387></bottomLeft>
            <topRight x = 184 y = 461></topRight>
        </range>

        <gauges filename = "gauges">
158,403,
153,417,
153,422,
180,424,
176,433,
176,437,
201,438,
198,447,
195,450,
223,450,
215,458,
214,463
        </gauges>

    </logData>
```

```

<!-- Settings for graphics are optional-->
<graphics>
  <vertical scale = 1></vertical>
  <!-- Photorealistic = 0, PARULA = 1, JET = 2 -->
  <surfaceShading type = 2>

    <!-- Eta = 0, U = 1, V = 2, |U+V| = 3, Vorticity = 4 -->
    <shadingVariable value = 0></shadingVariable>

    <!-- -minMaxValue < value < +minMaxValue -->
    <colormap auto = false min = -1 max = 1></colormap>
  </surfaceShading>

  <!-- Textures = 0 to 5, COLORMAP = 6, CONTOURS = 7 -->
  <terrainTexture type = 6>
    <colormap auto = false min = -20 max = 4></colormap>
  </terrainTexture>

  <skybox type = 3></skybox>

  <grid show = true scale = 1></grid>

  <lighting ambient = 0.25 sunAltitude = 45 sunAzimuth = 30></lighting>
  <fresnel coef = 0.5 refractive_index = 3 attenuation_1 = 0 attenuation_2
= 0.1></fresnel>
  <camera auto = true FOV = 50 x = -100 y = -100 z = 40 pitch = -1 yaw =
0.785></camera>
</graphics>

</Experiment>

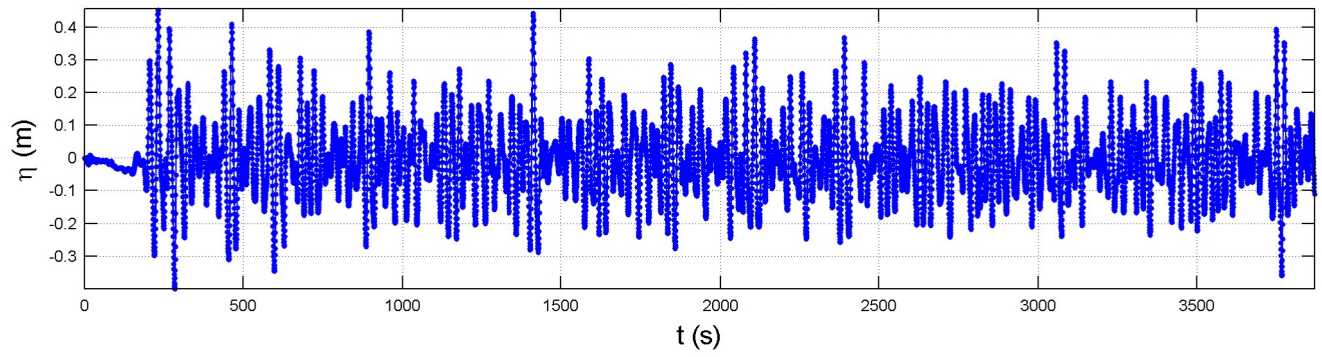
```

Apéndice VII: Gráficas de Celeris.

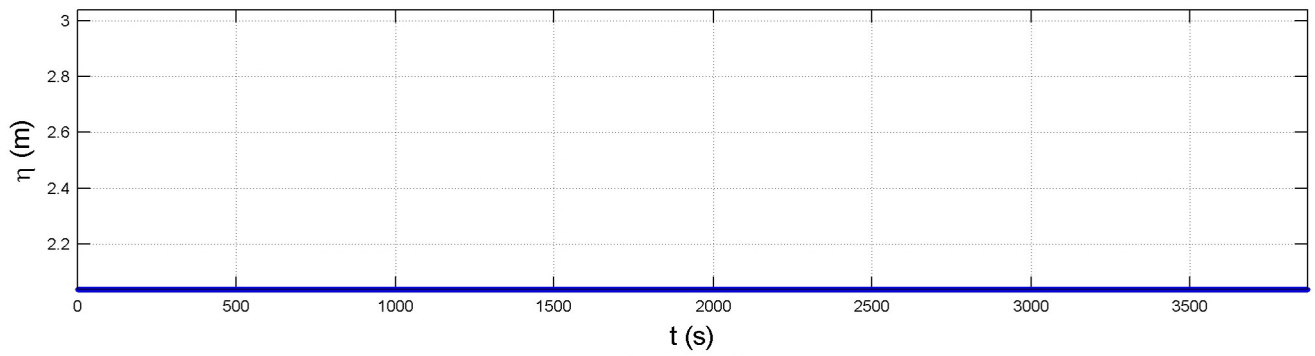
Se presentan a continuación gráficas (Hs-t) de los 7 eventos de inundación expuestos, con el objetivo de representar más detalladamente su evolución en el tiempo. Estas registran la actividad de los puntos definidos en la sección 3.2.4. Se dispone también de vídeos de las simulaciones que serán mostrados en el momento de exponer el Trabajo de Fin de Grado y a disposición de cualquier persona interesada.

Además, se adjuntan las gráficas Hs- t de las simulaciones ante las 2 familias de oleaje definidas para la solución definitiva, justificando así la decisión tomada.

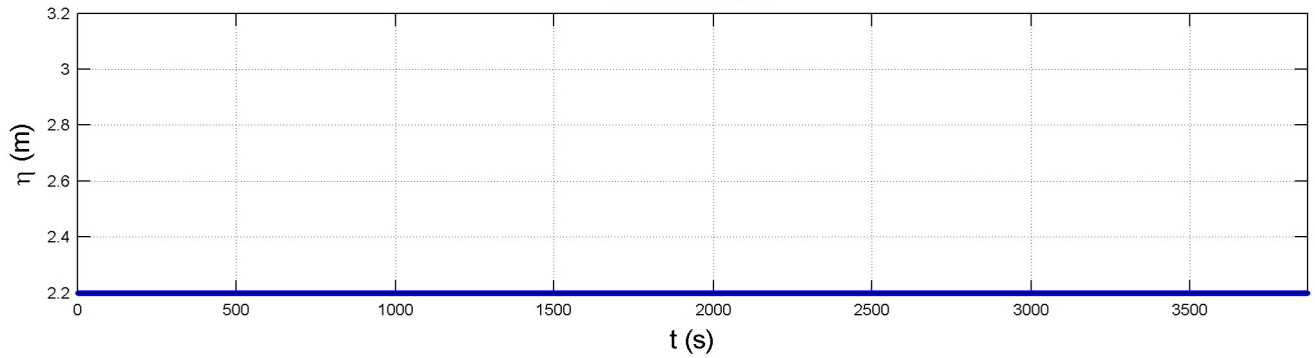
P1 Ene-1999



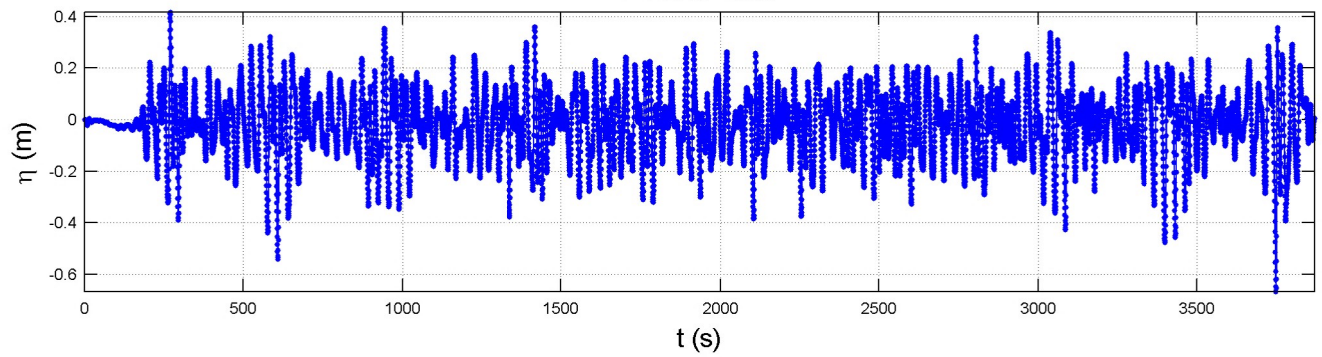
P2 Ene-1999



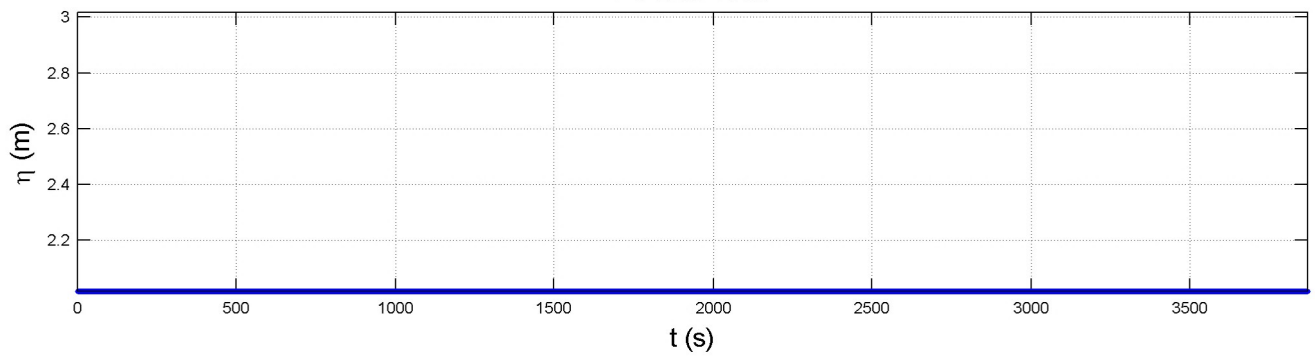
P3 Ene-1999



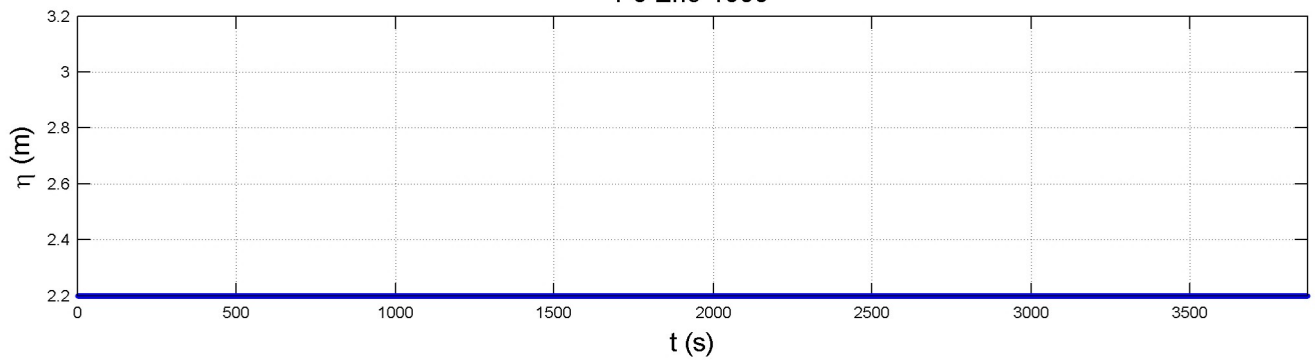
P4 Ene-1999



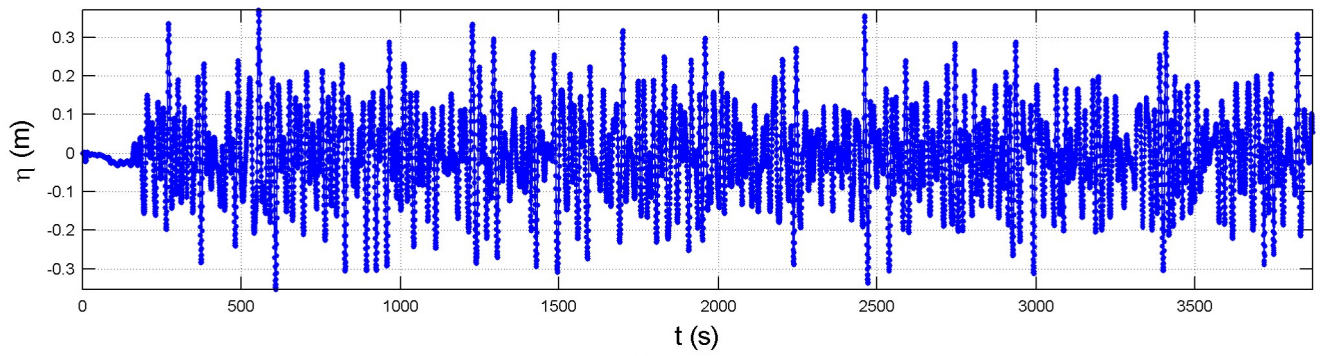
P5 Ene-1999



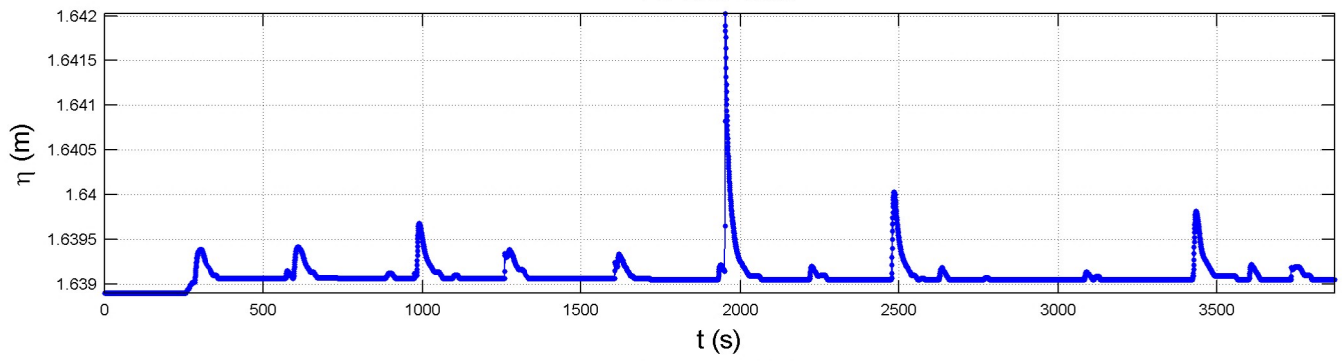
P6 Ene-1999



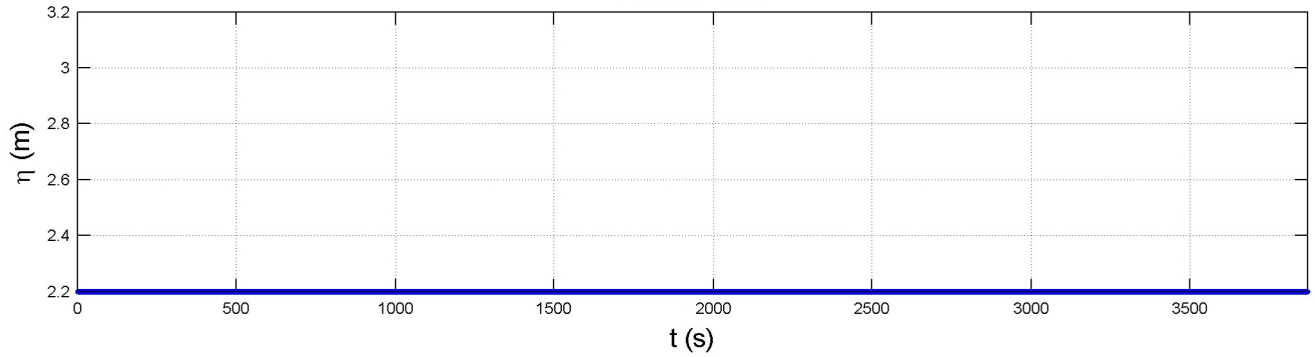
P7 Ene-1999



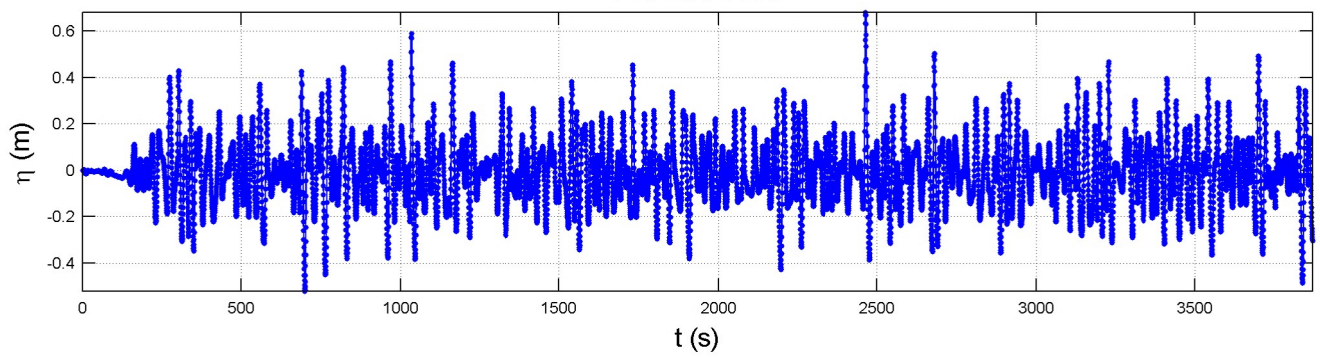
P8 Ene-1999



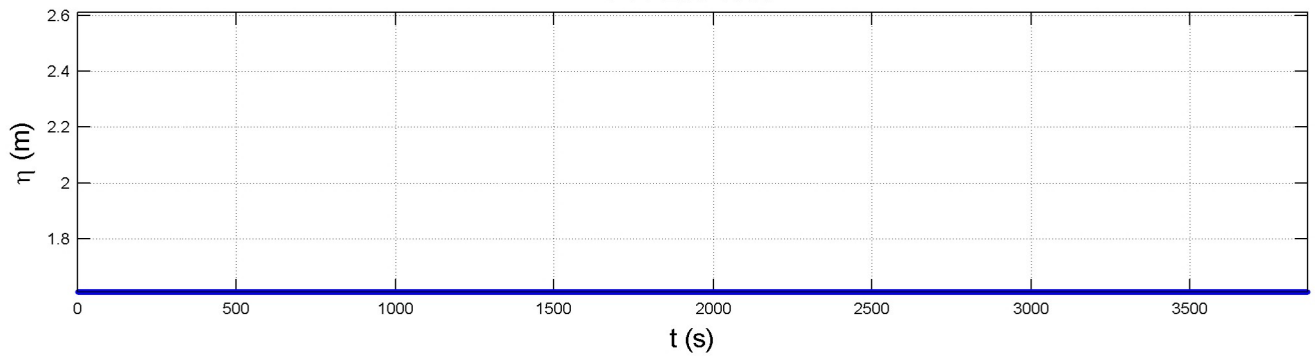
P9 Ene-1999



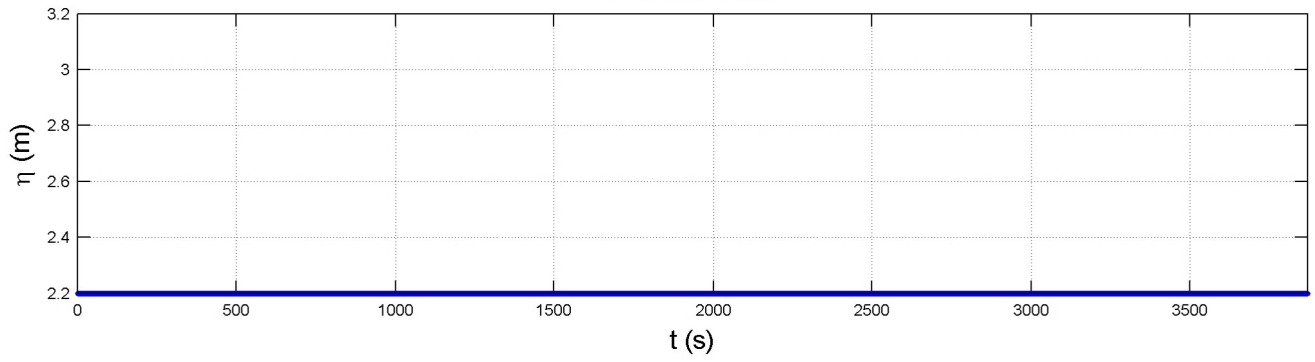
P10 Ene-1999



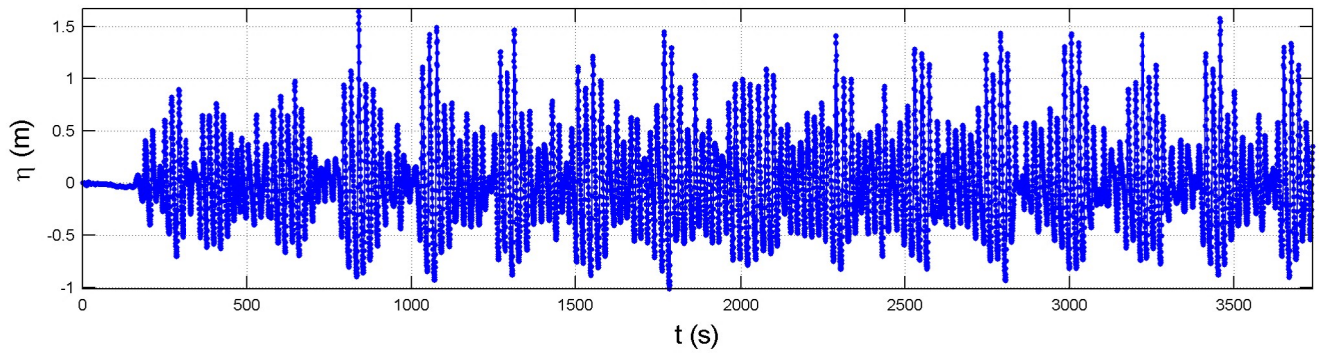
P11 Ene-1999



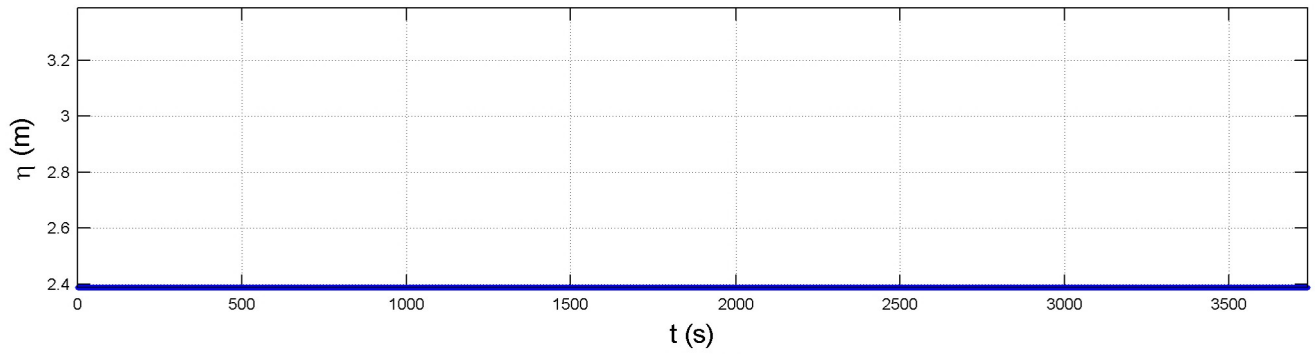
P12 Ene-1999



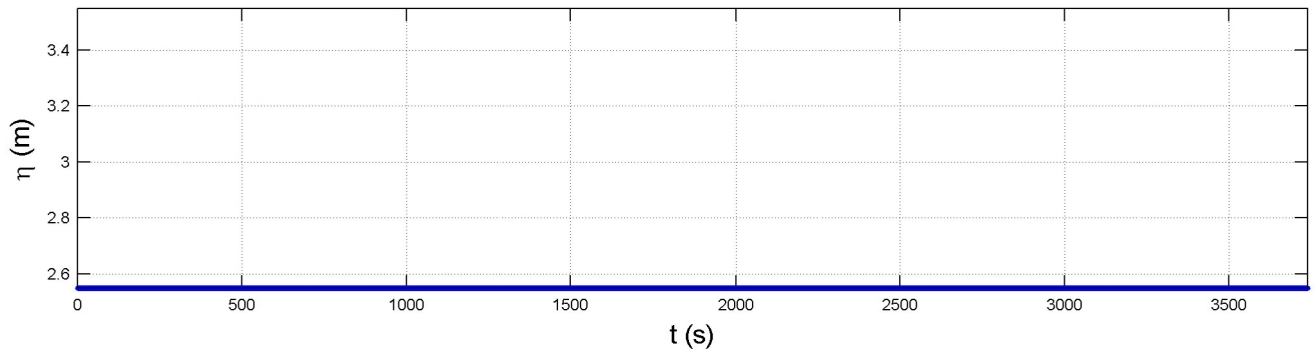
P1 Jul-2007



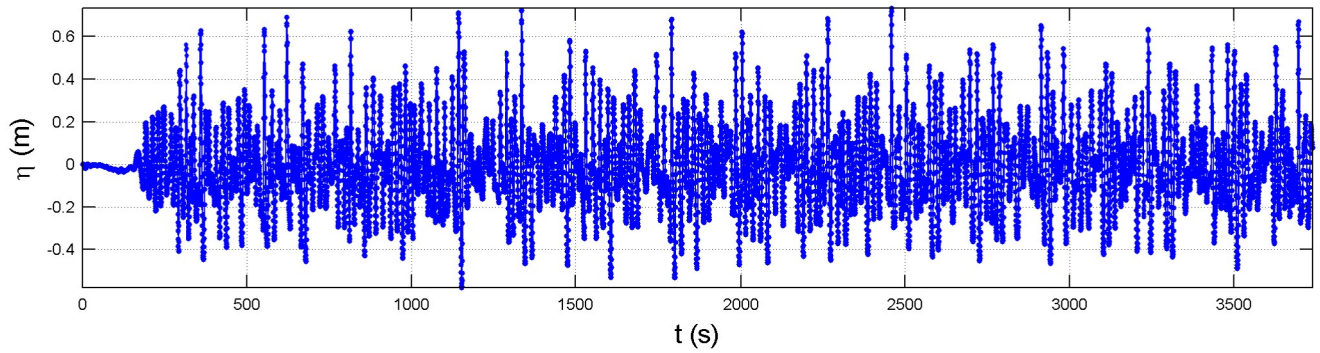
P2 Jul-2007



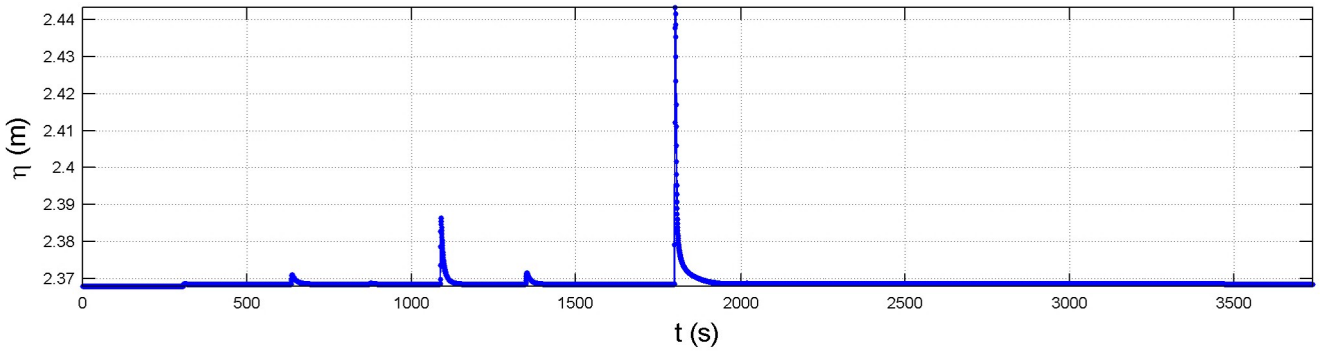
P3 Jul-2007



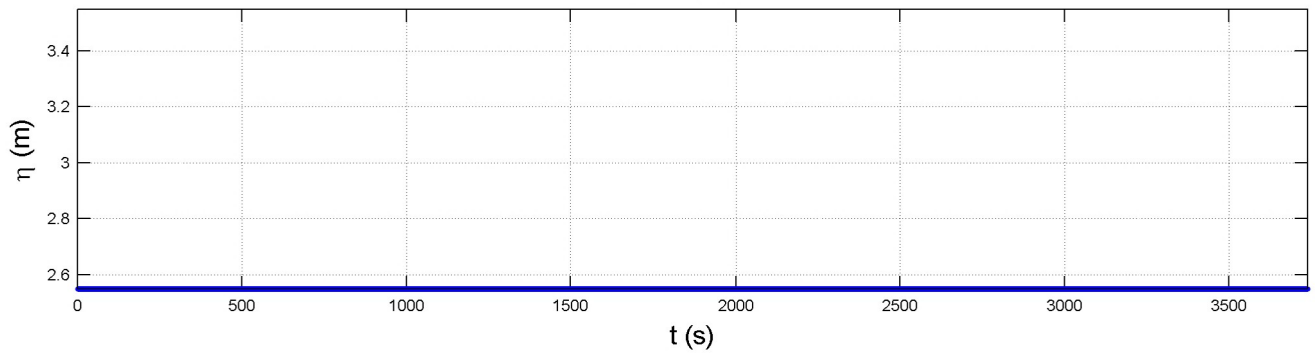
P4 Jul-2007



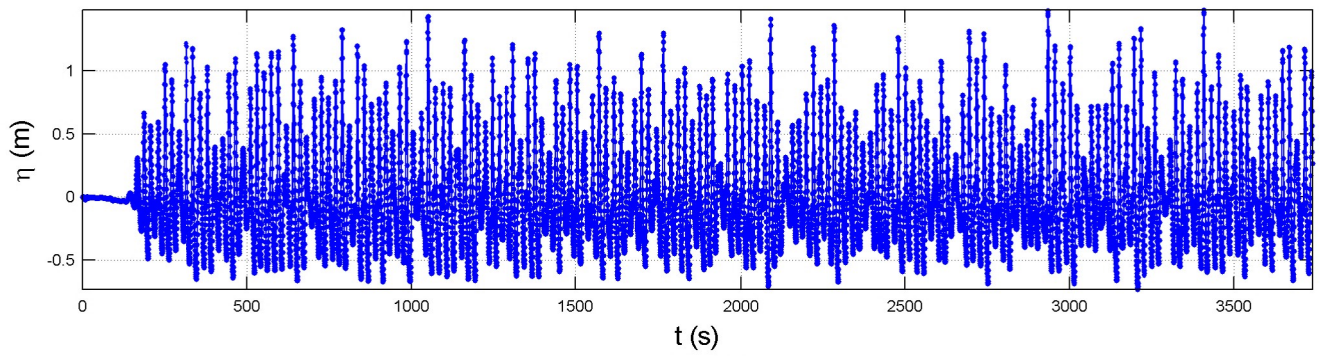
P5 Jul-2007



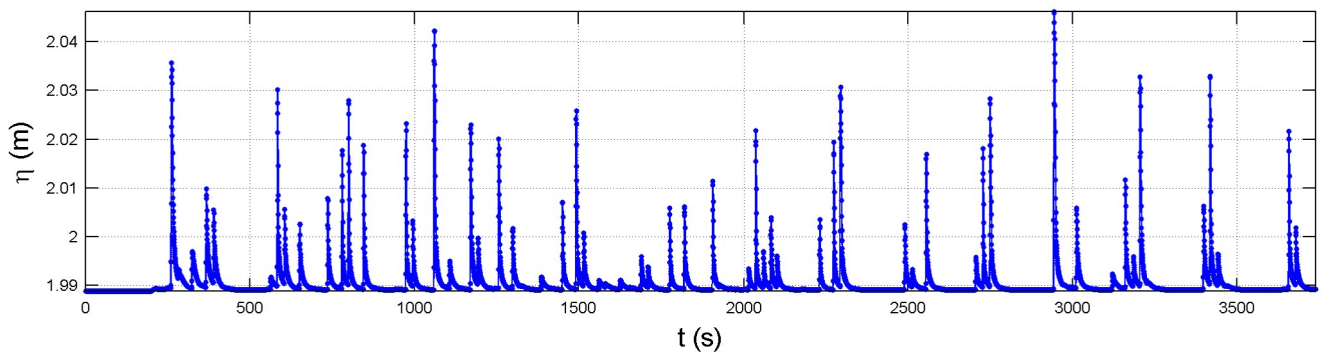
P6 Jul-2007



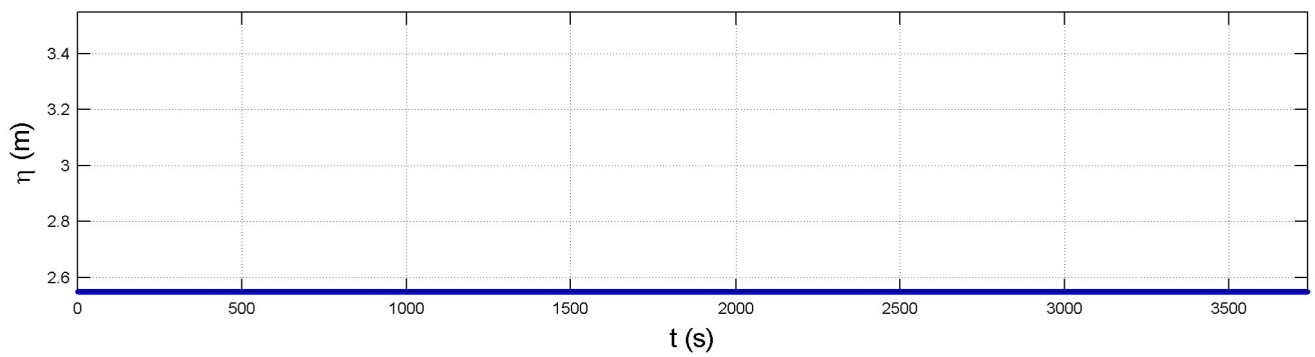
P7 Jul-2007



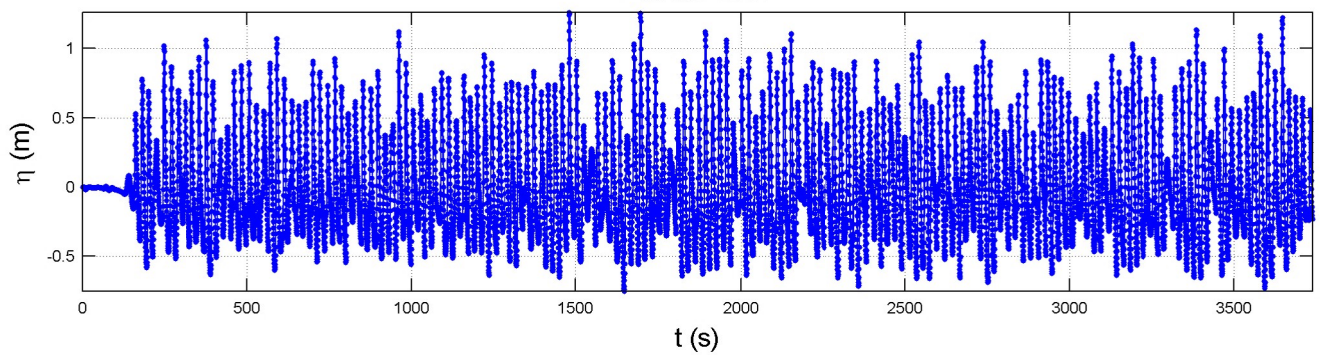
P8 Jul-2007



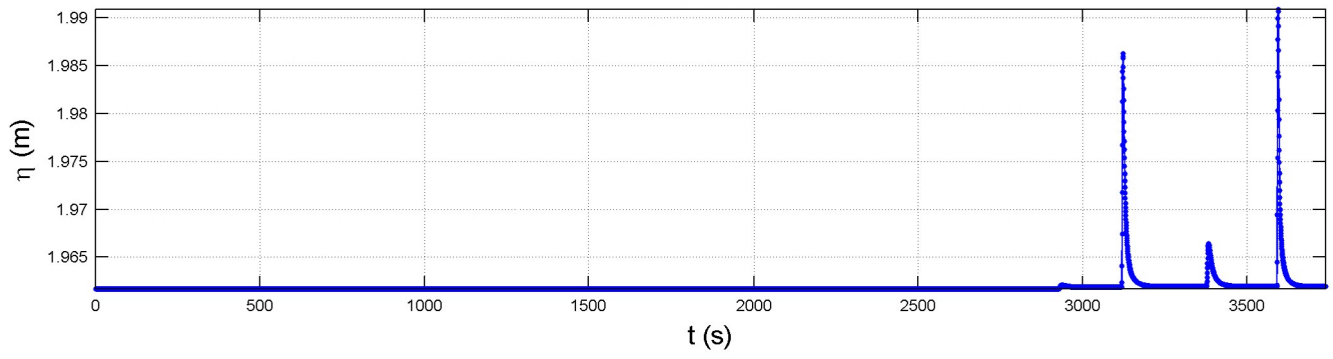
P9 Jul-2007



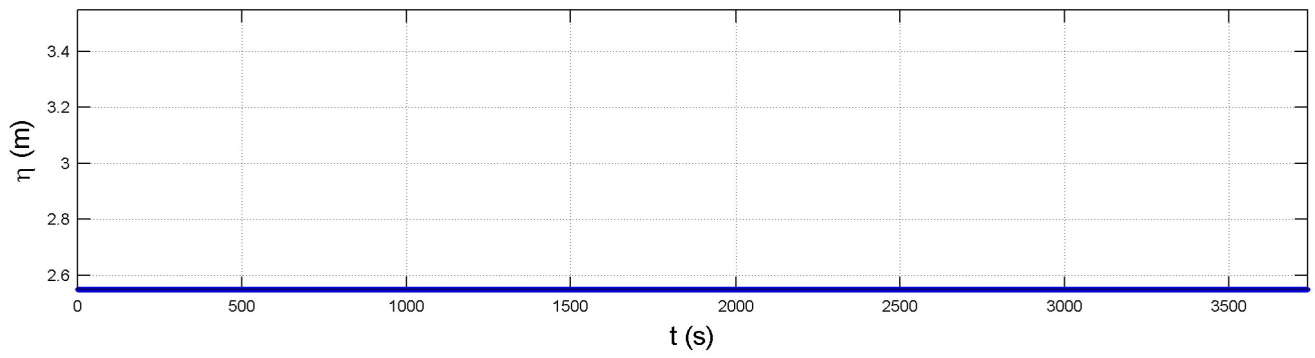
P10 Jul-2007



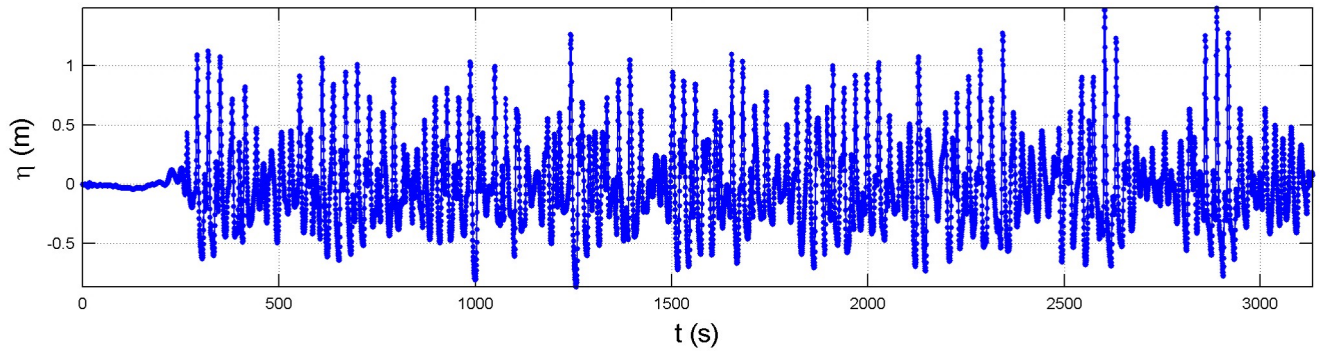
P11 Jul-2007



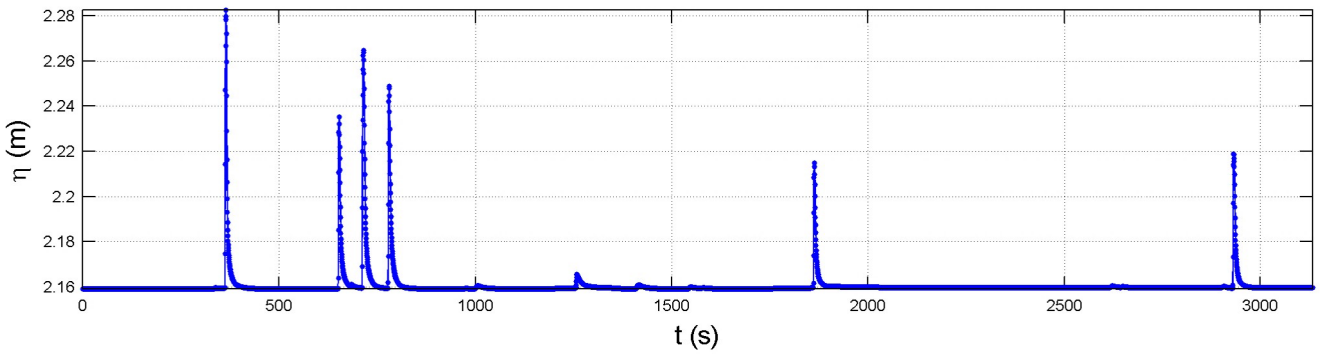
P12 Jul-2007



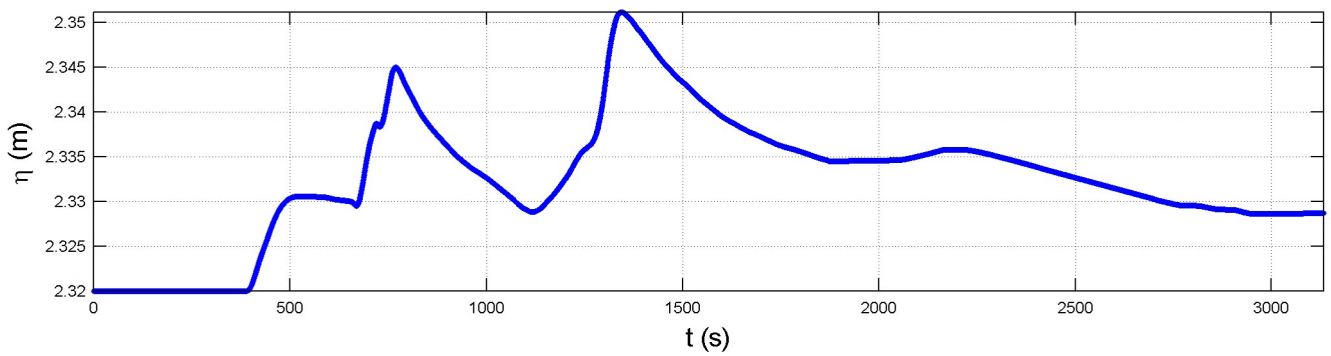
P1 Dic-2010



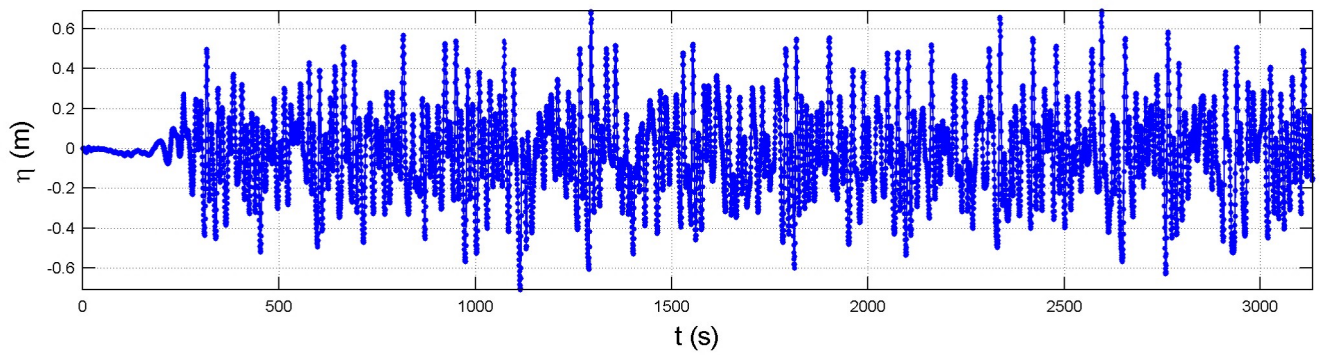
P2 Dic-2010



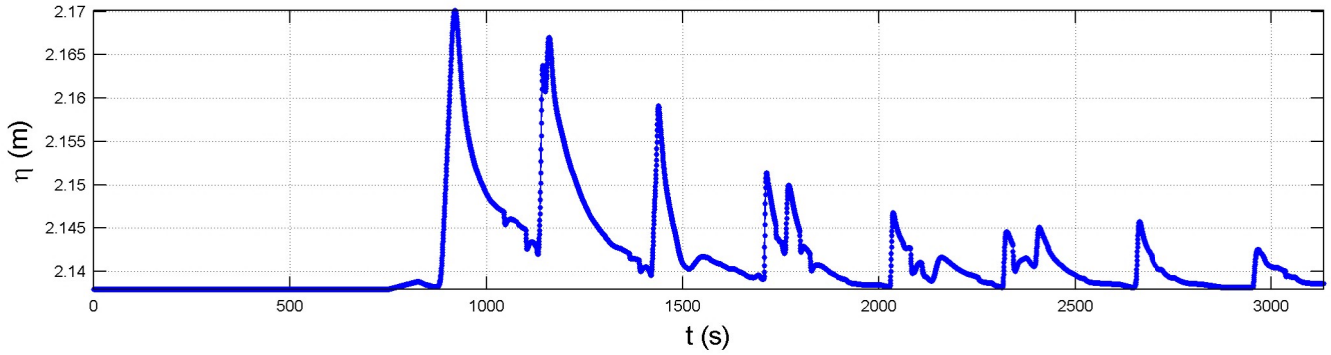
P3 Dic-2010



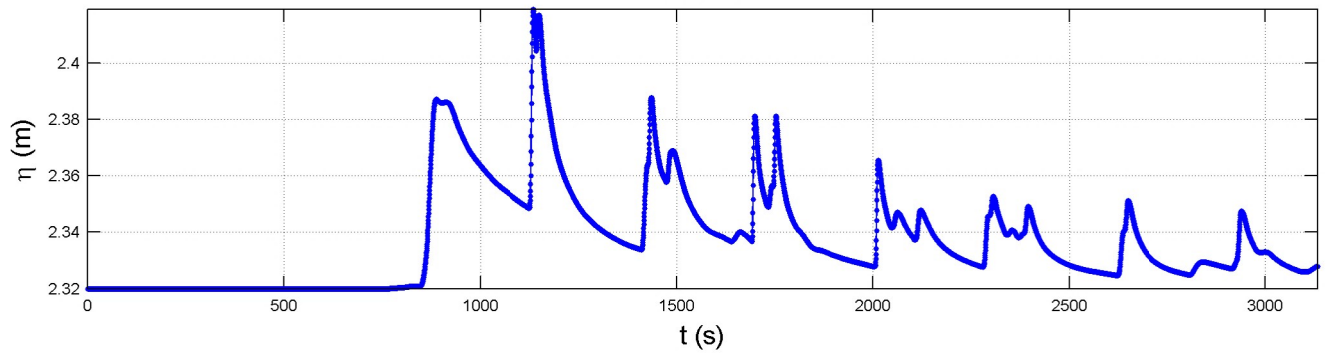
P4 Dic-2010



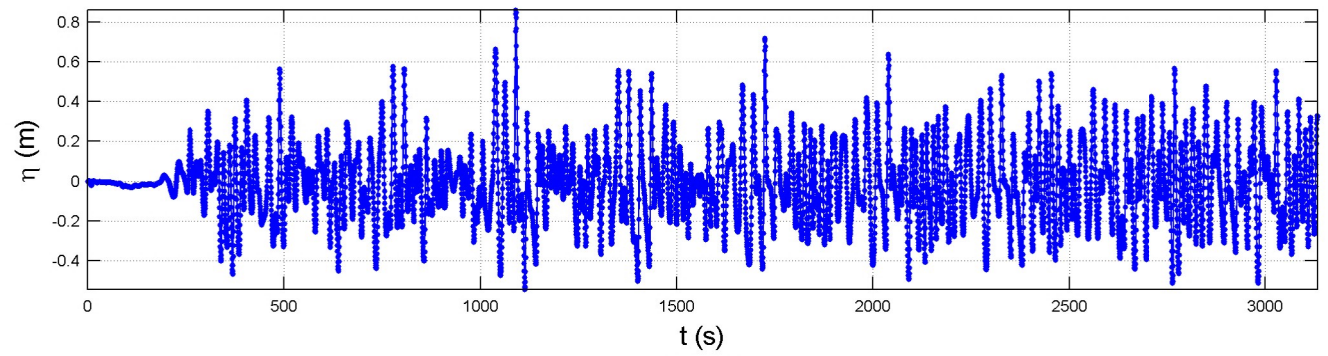
P5 Dic-2010



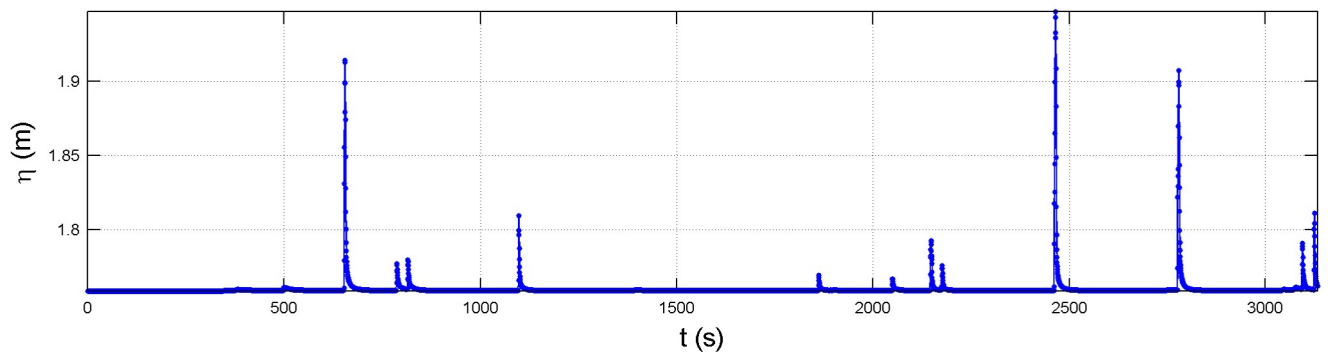
P6 Dic-2010



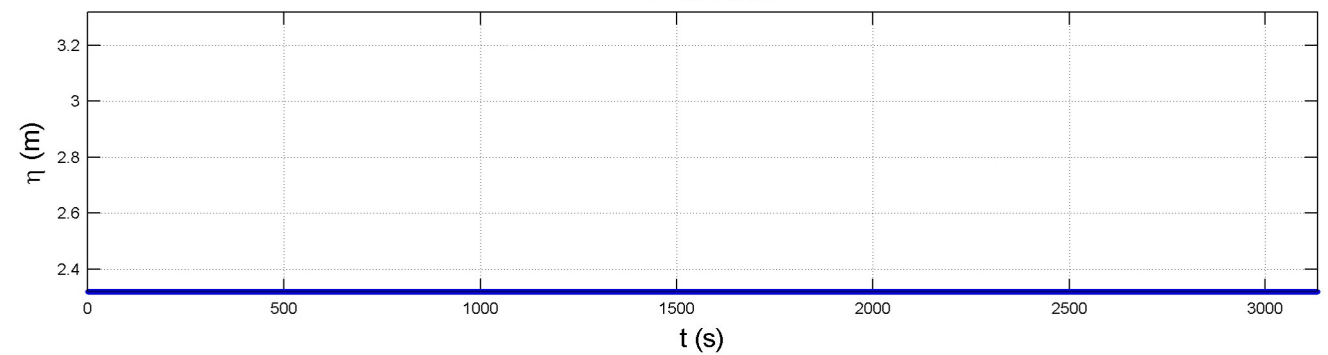
P7 Dic-2010



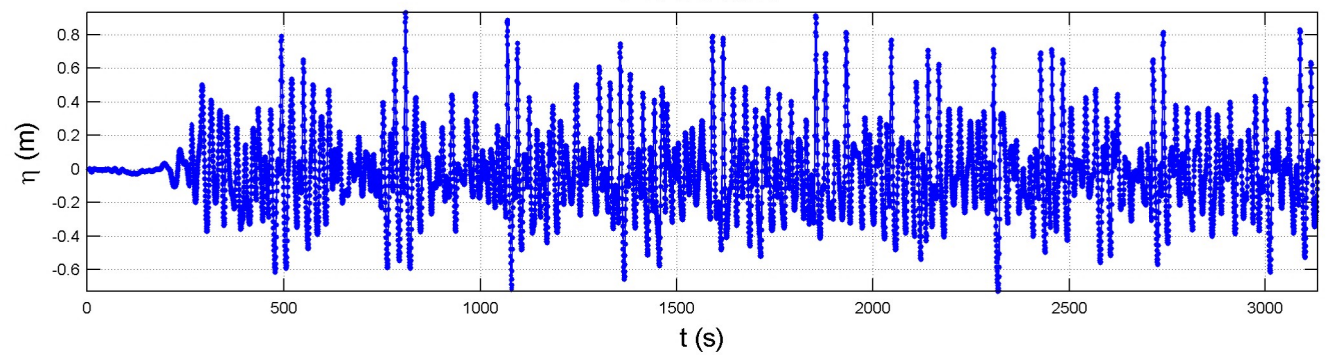
P8 Dic-2010



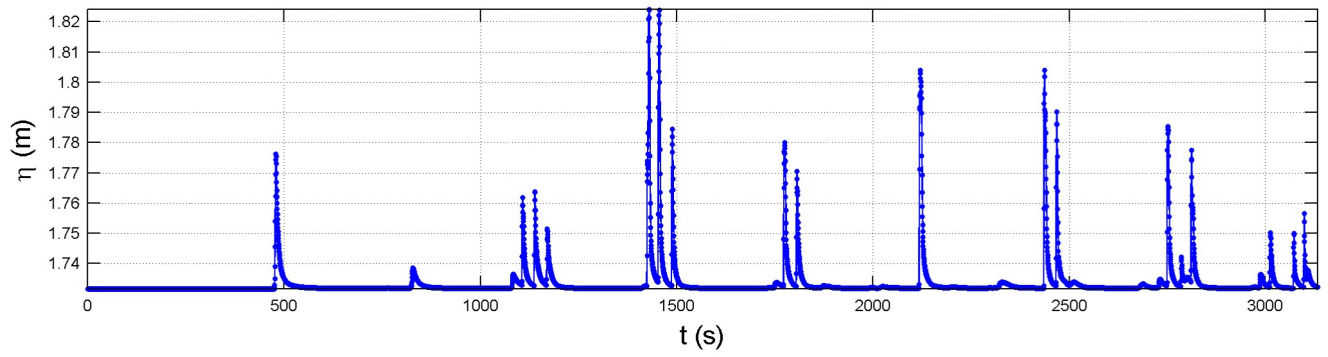
P9 Dic-2010



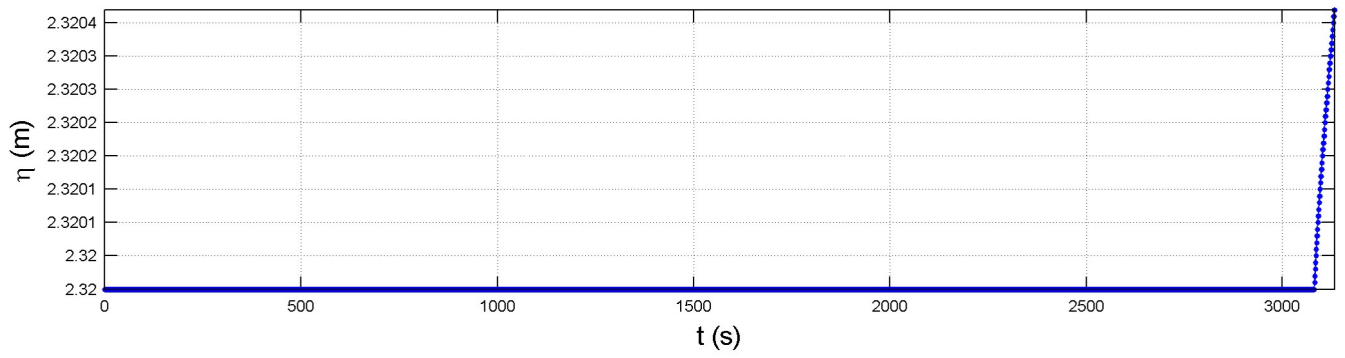
P10 Dic-2010



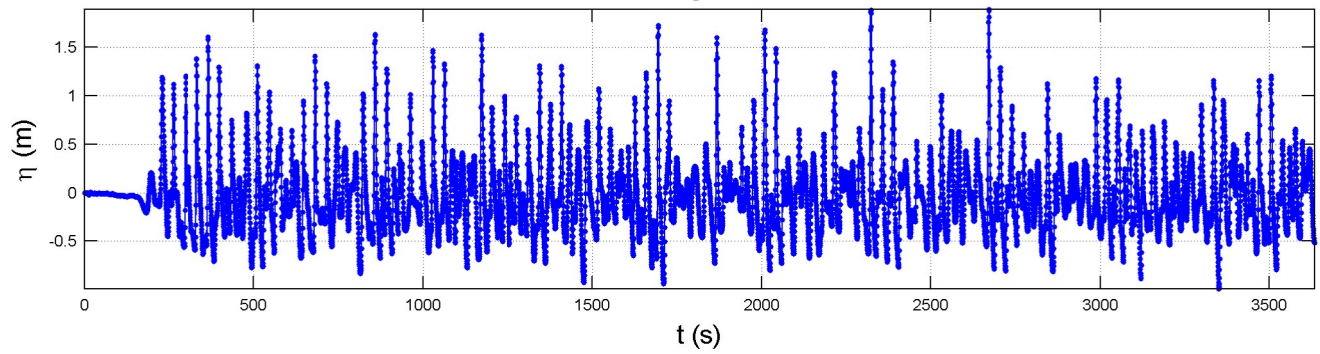
P11 Dic-2010



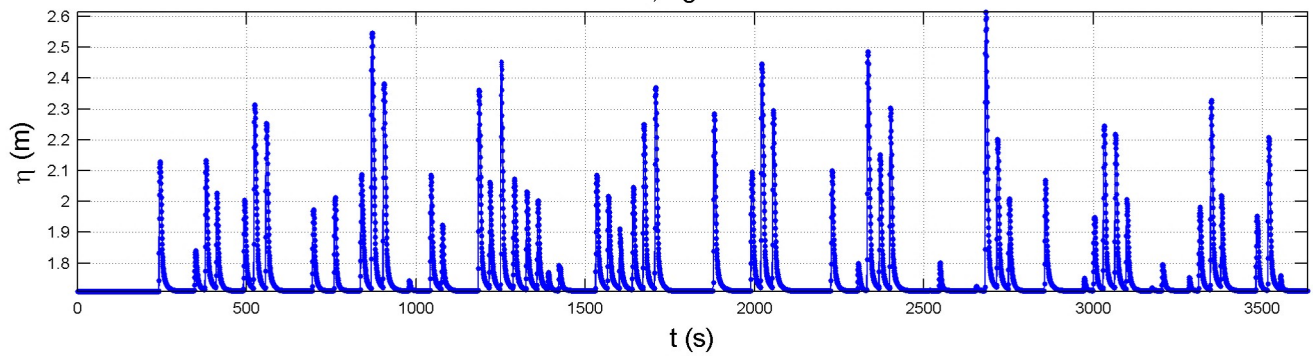
P12 Dic-2010



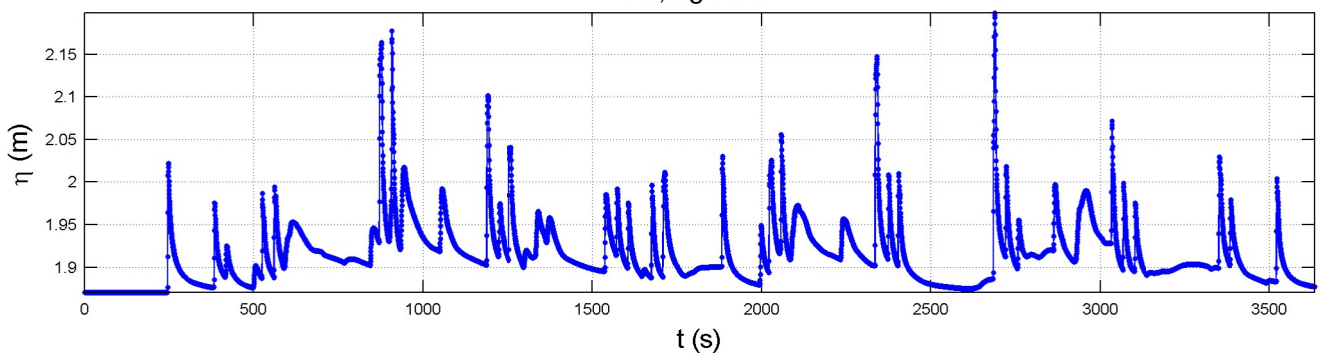
P1, Ag-2011



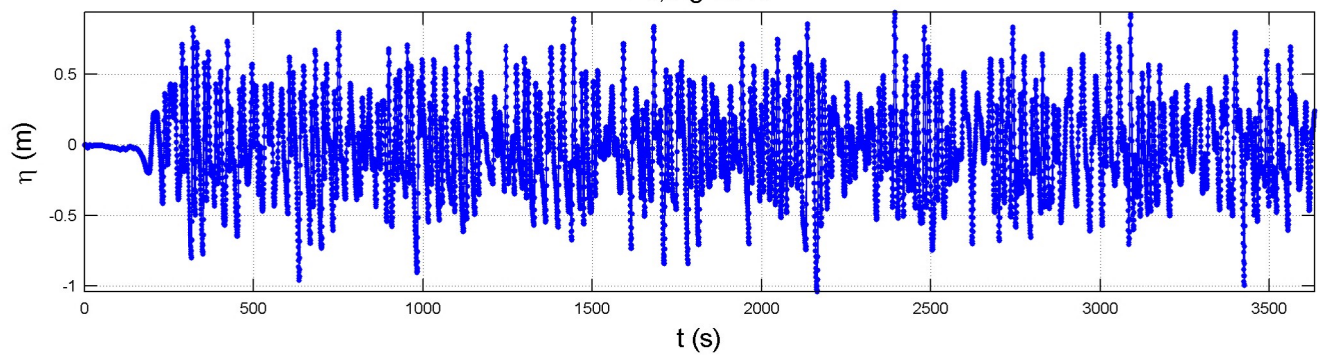
P2, Ag-2011



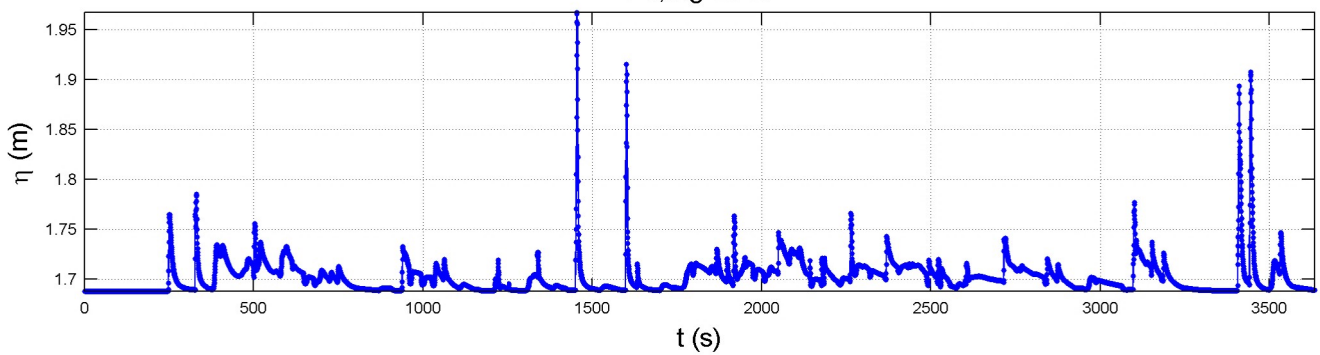
P3, Ag-2011



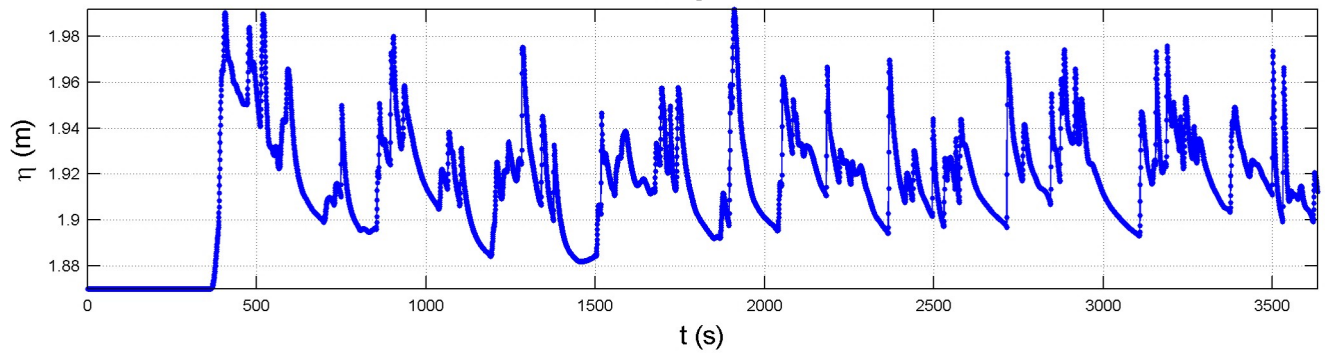
P4, Ag-2011



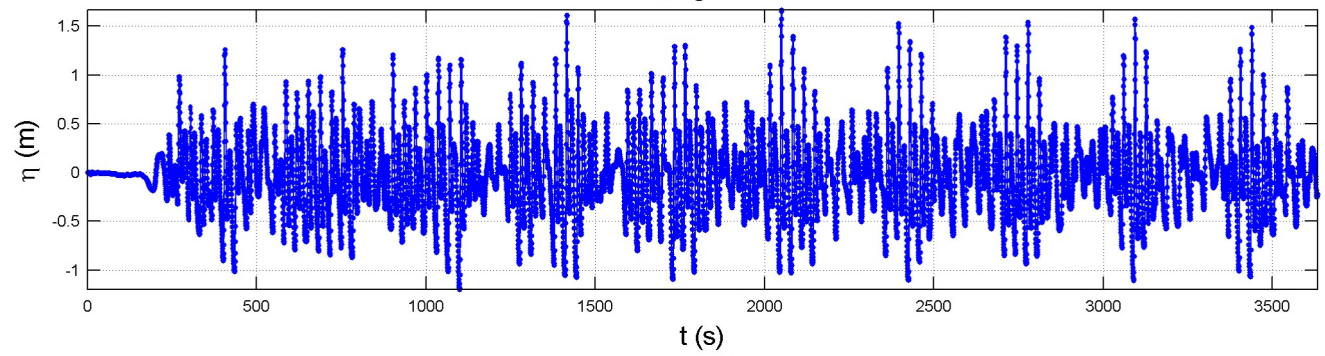
P5, Ag-2011



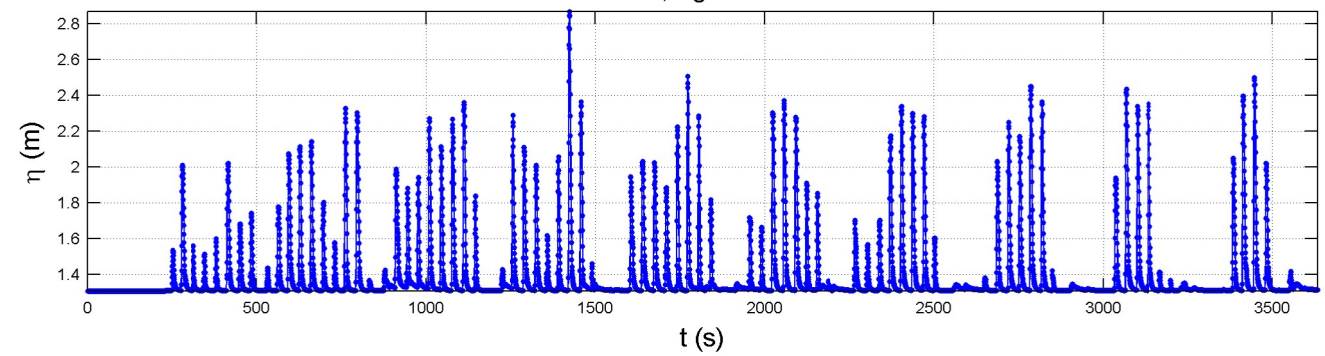
P6, Ag-2011



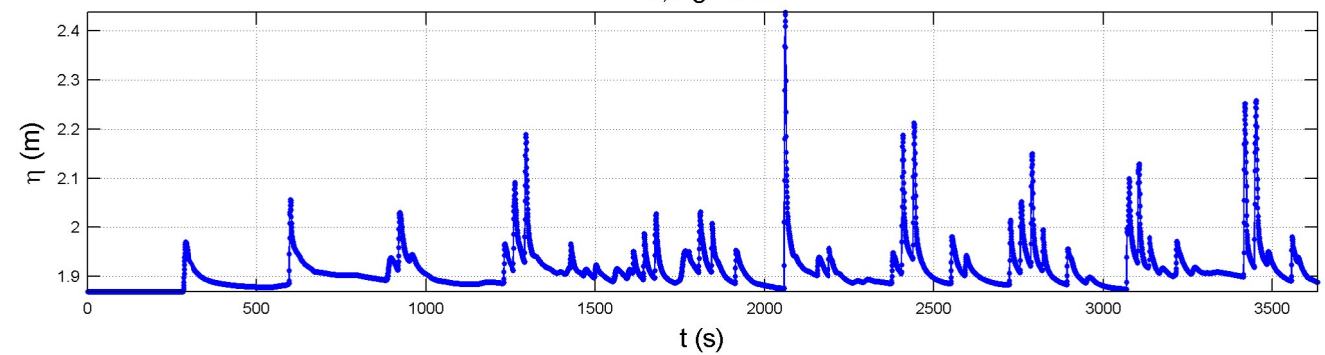
P7, Ag-2011



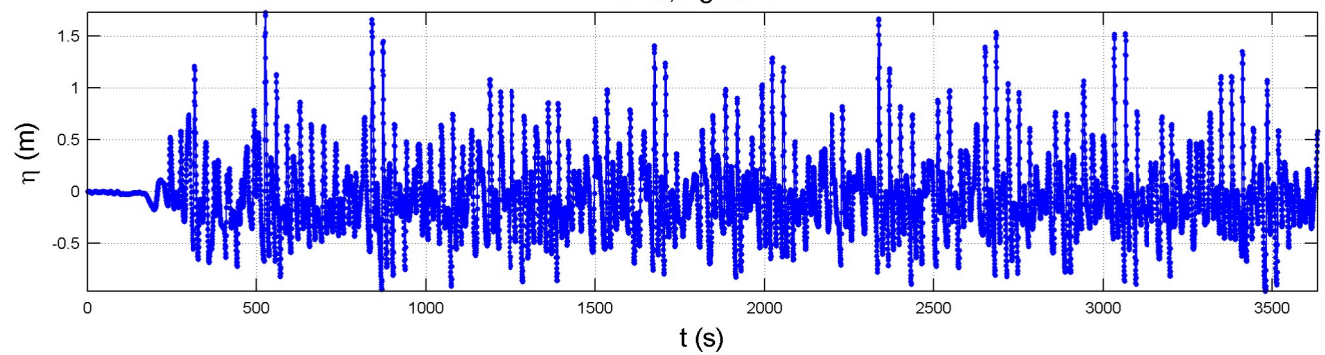
P8, Ag-2011



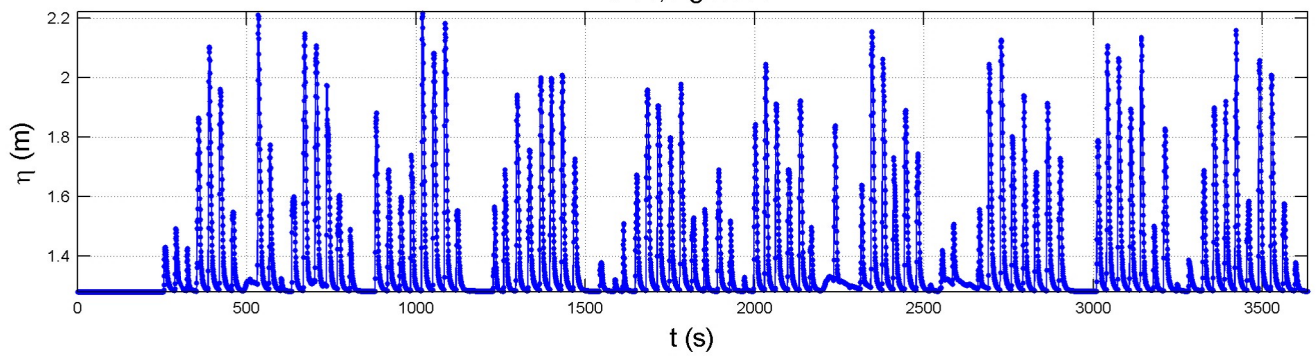
P9, Ag-2011



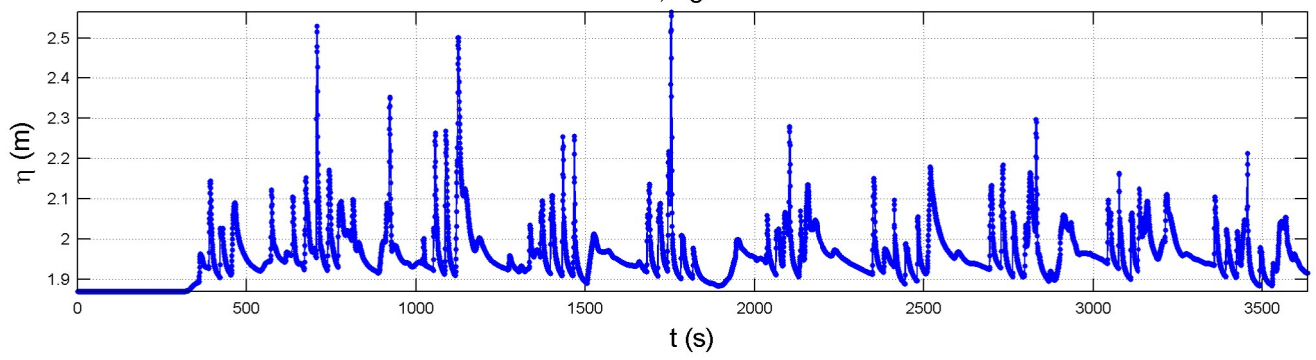
P10, Ag-2011



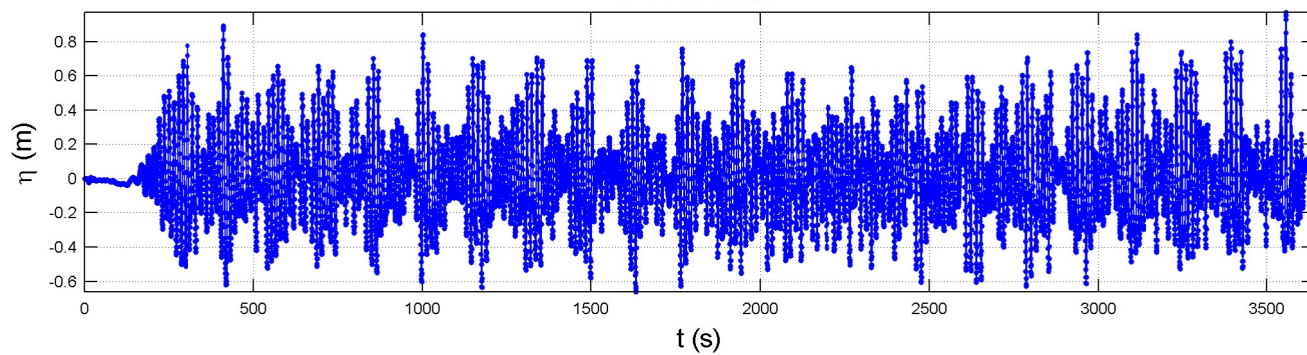
P11, Ag-2011



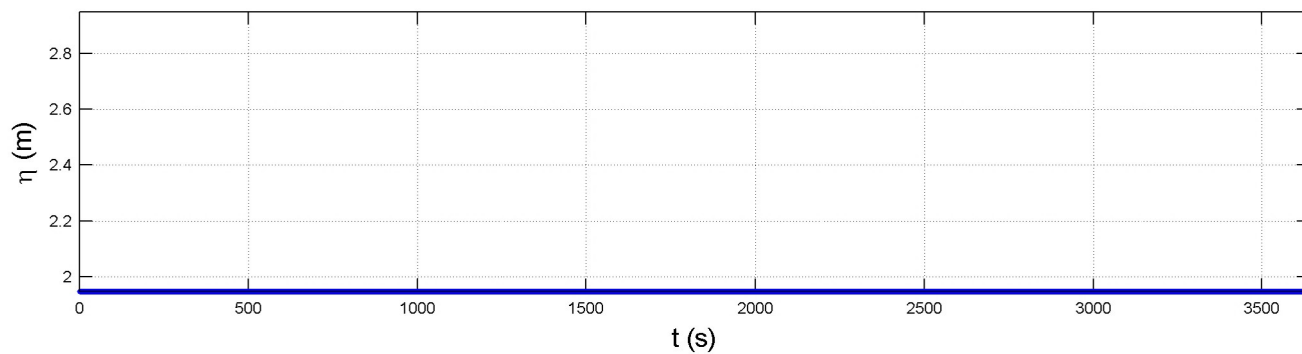
P12, Ag-2011



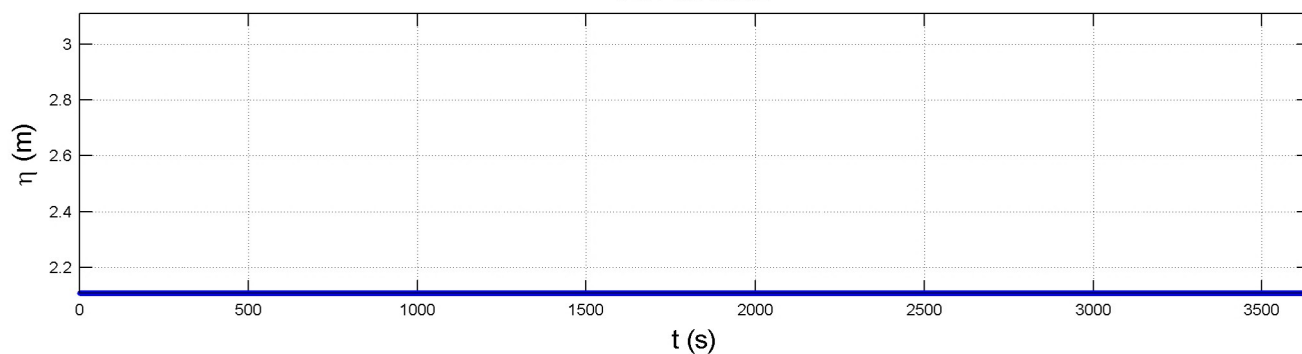
P1 Feb-2012



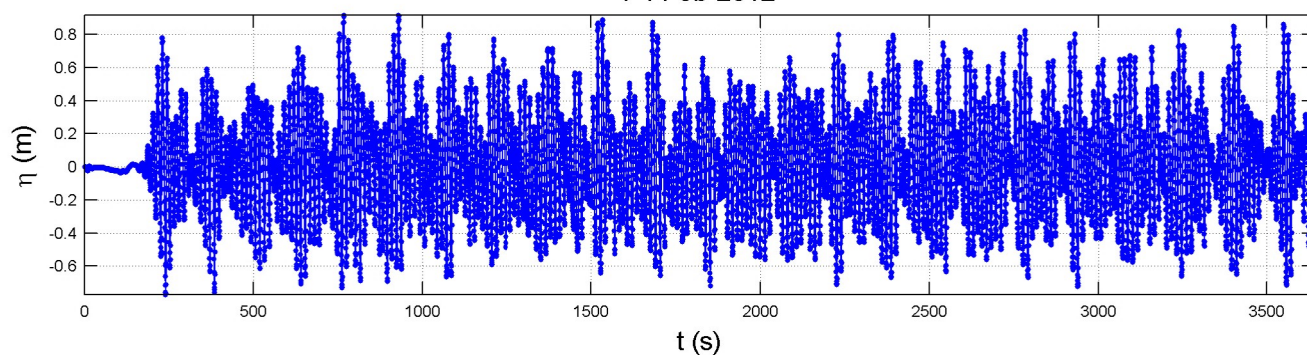
P2 Feb-2012



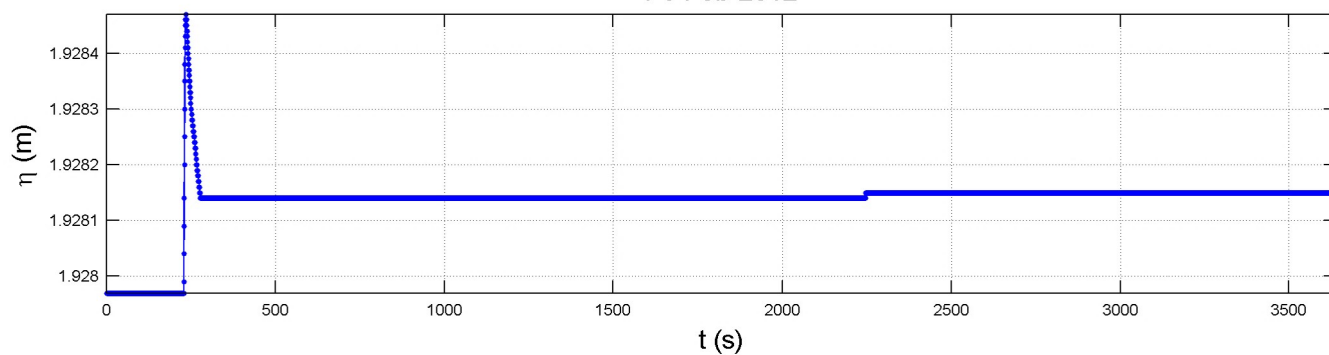
P3 Feb-2012



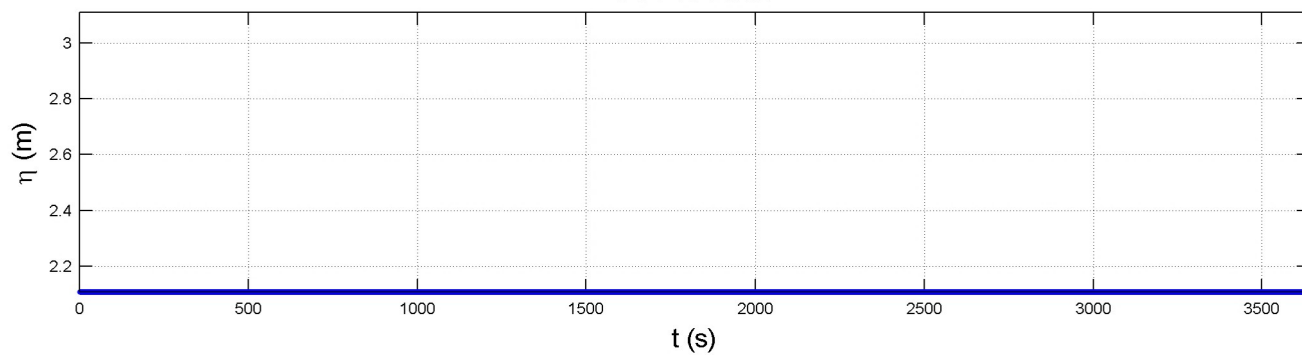
P4 Feb-2012



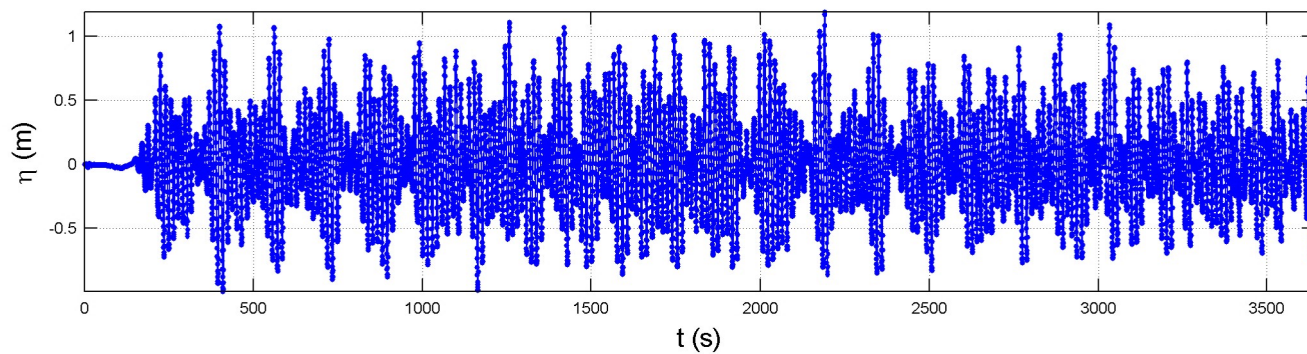
P5 Feb-2012



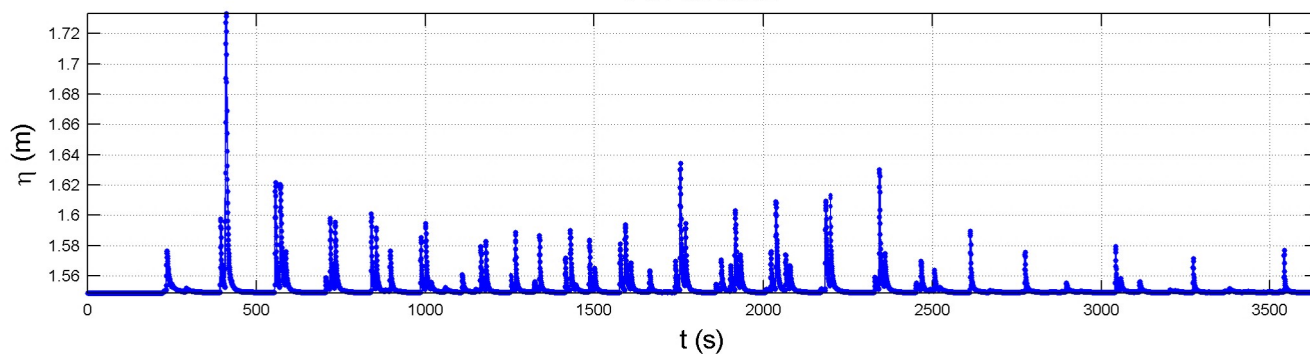
P6 Feb-2012



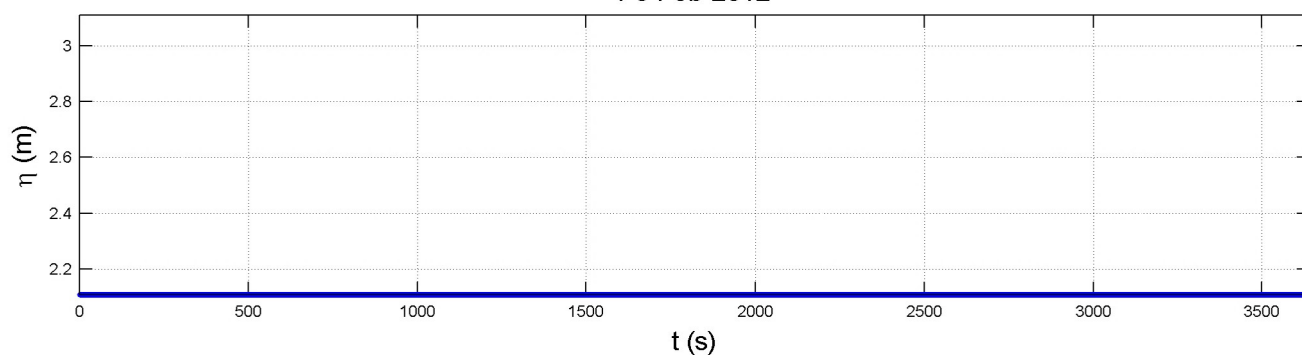
P7 Feb-2012



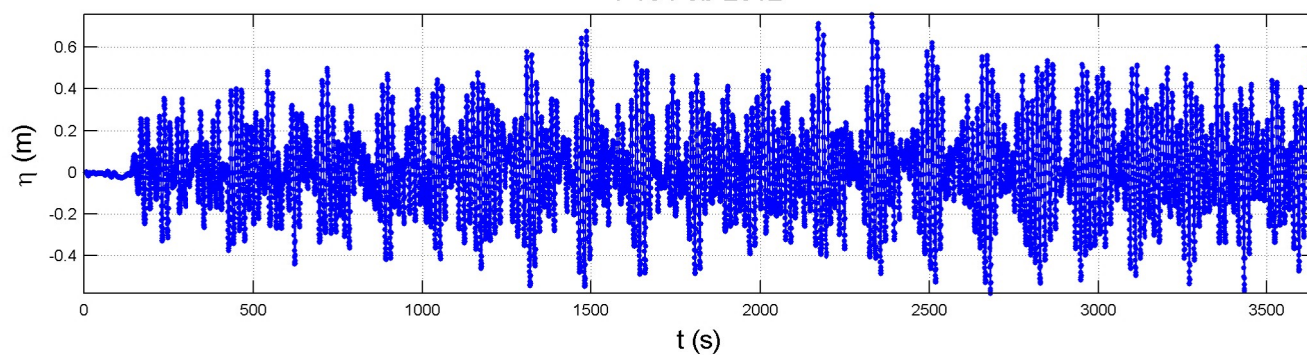
P8 Feb-2012



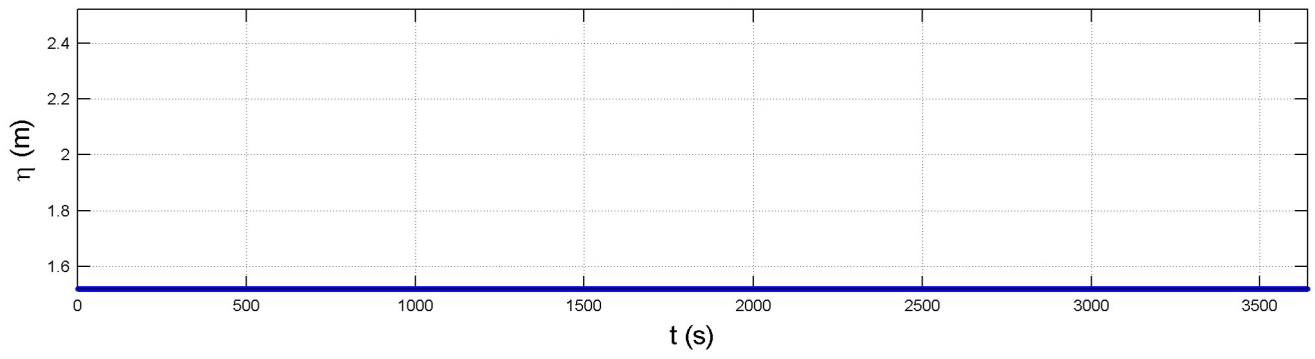
P9 Feb-2012



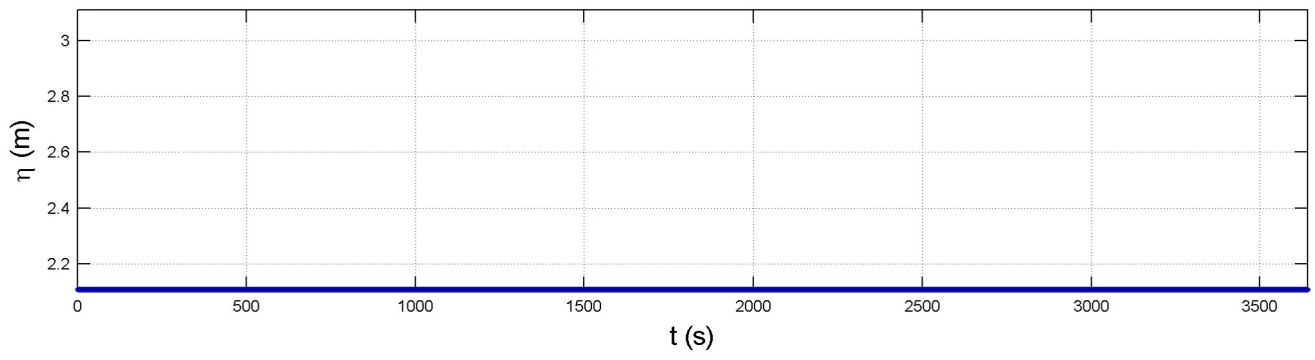
P10 Feb-2012



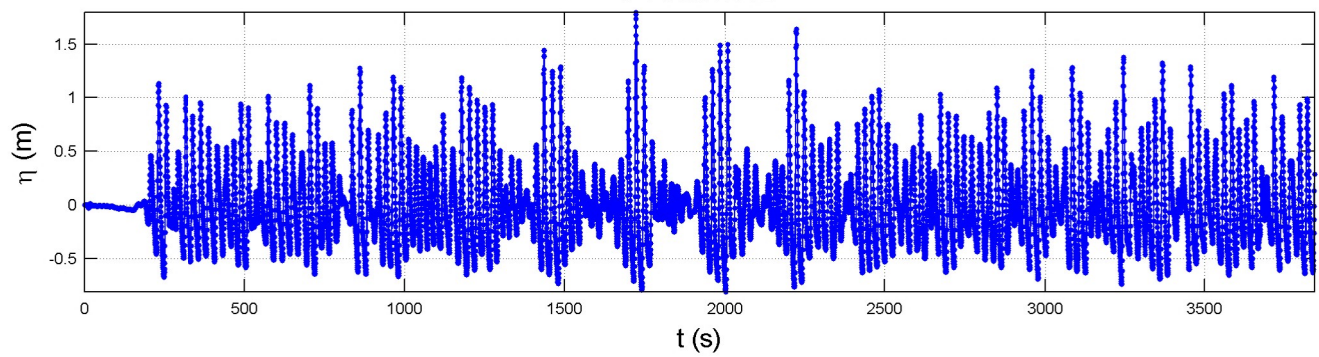
P11 Feb-2012



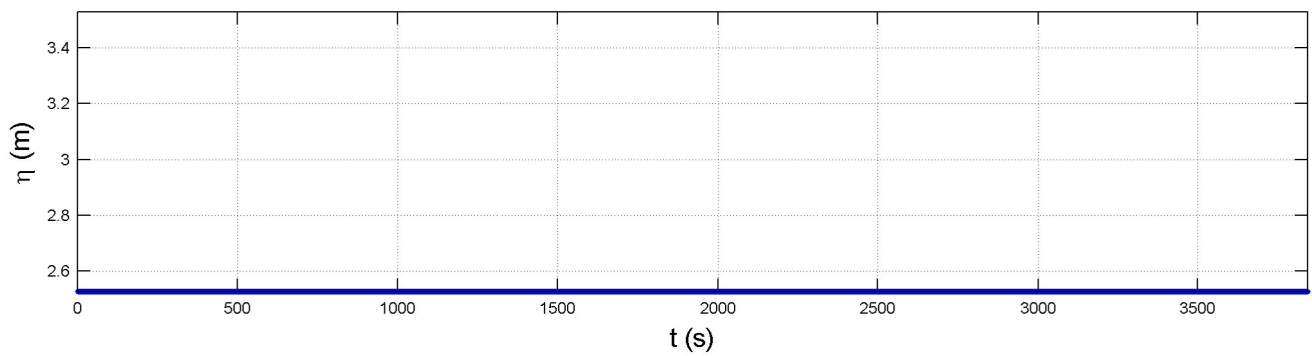
P12 Feb-2012



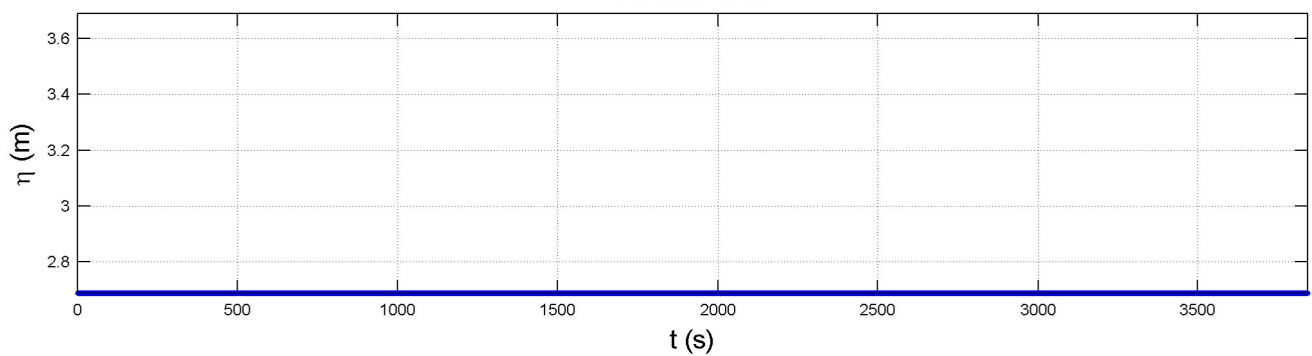
P1 Jun-2012



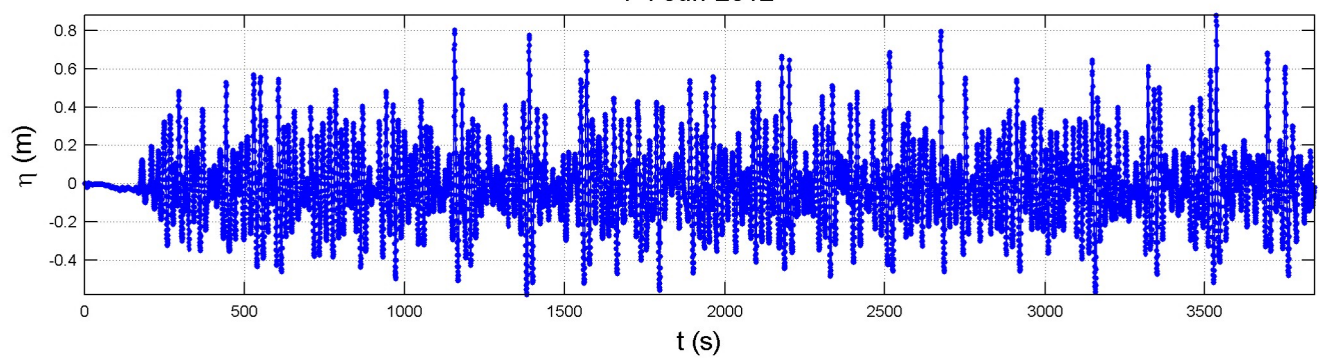
P2 Jun-2012



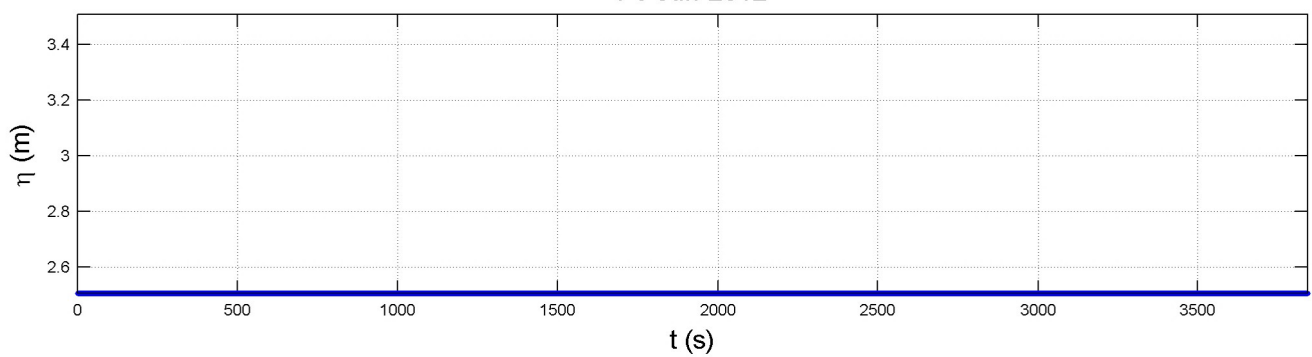
P3 Jun-2012



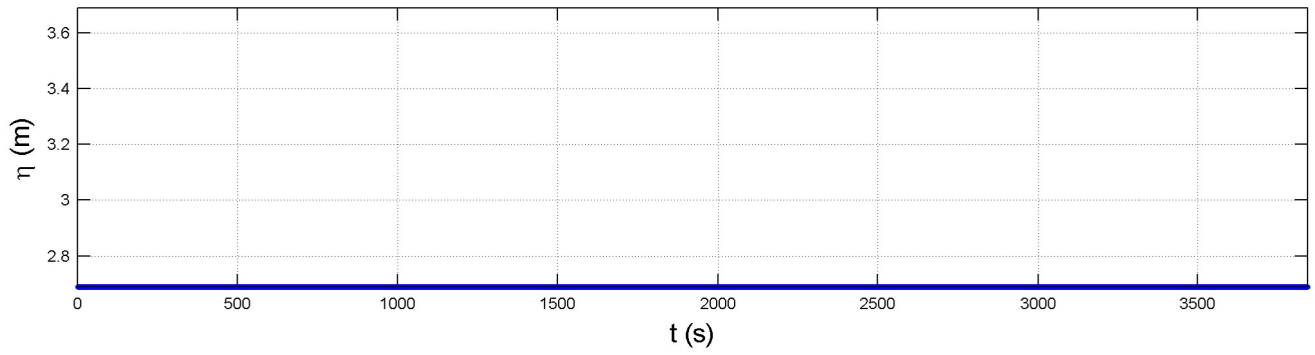
P4 Jun-2012



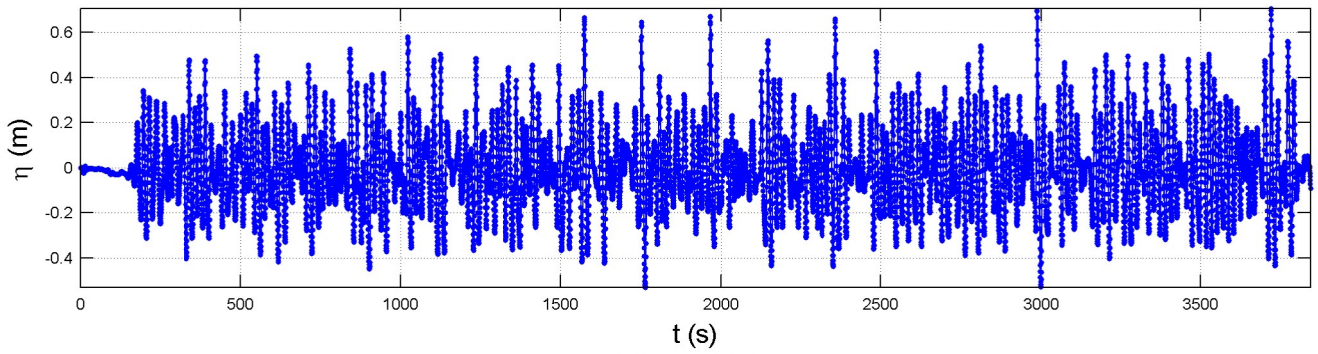
P5 Jun-2012



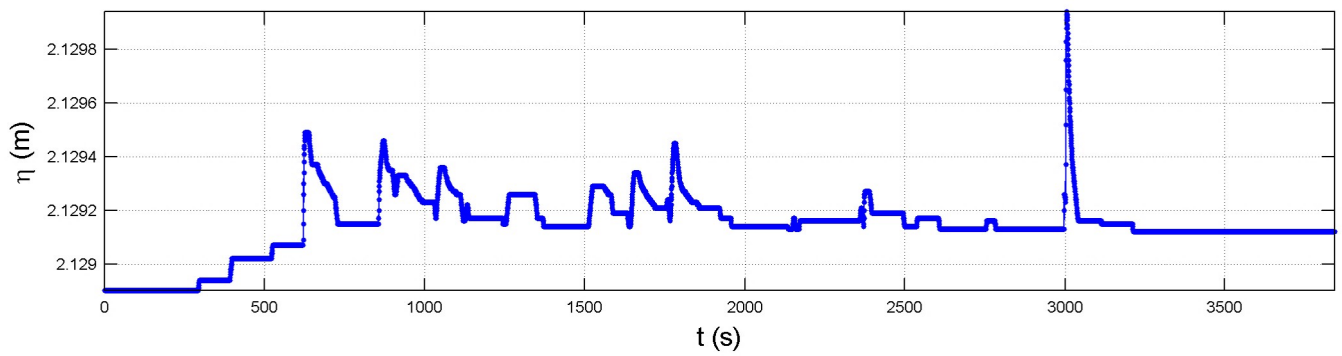
P6 Jun-2012



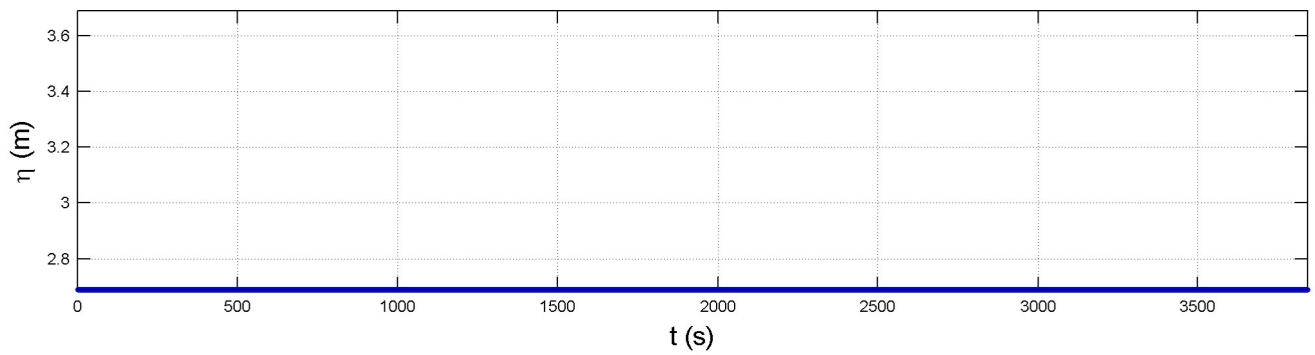
P7 Jun-2012



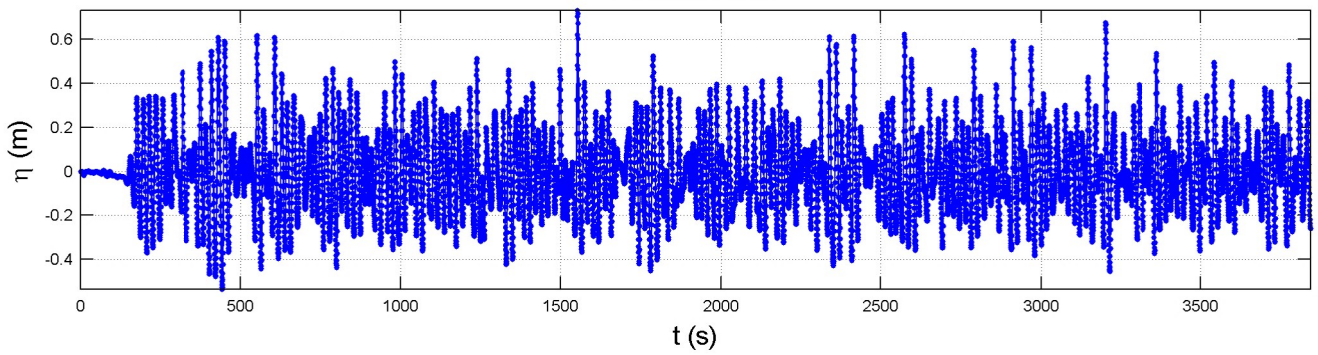
P8 Jun-2012



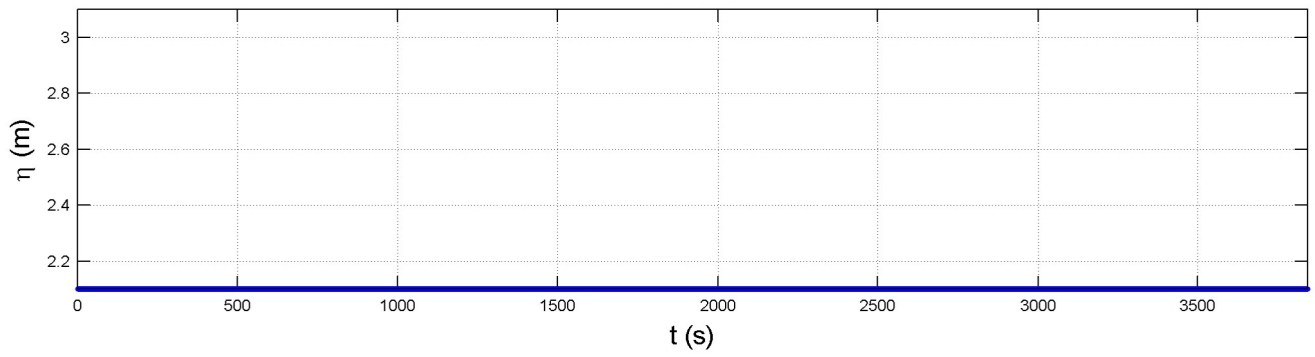
P9 Jun-2012



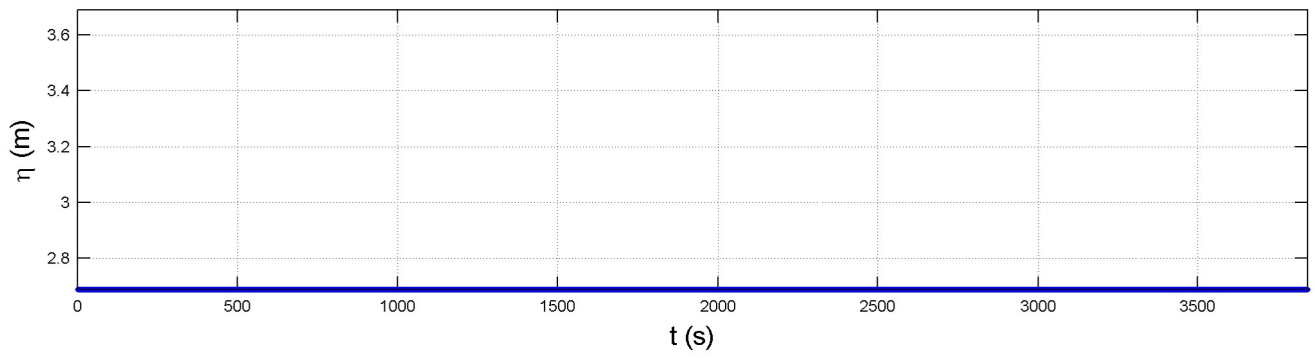
P10 Jun-2012



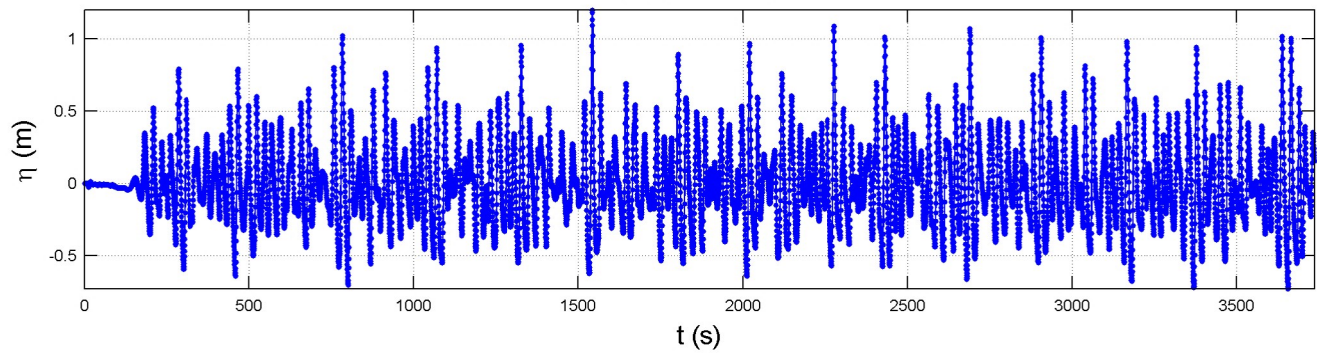
P11 Jun-2012



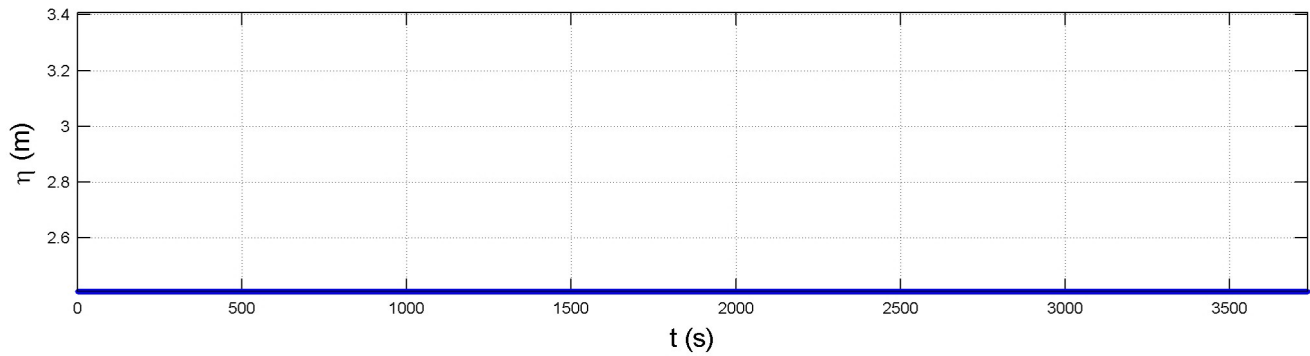
P12 Jun-2012



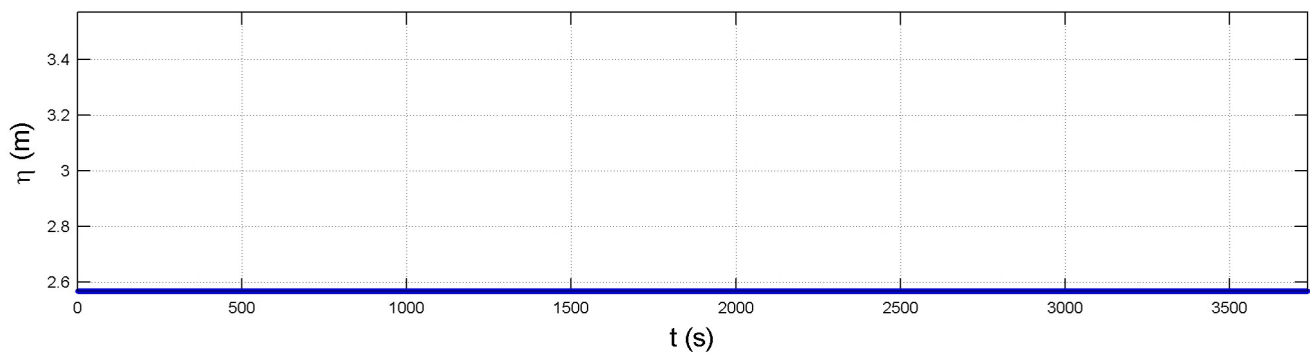
P1 Jun-2014



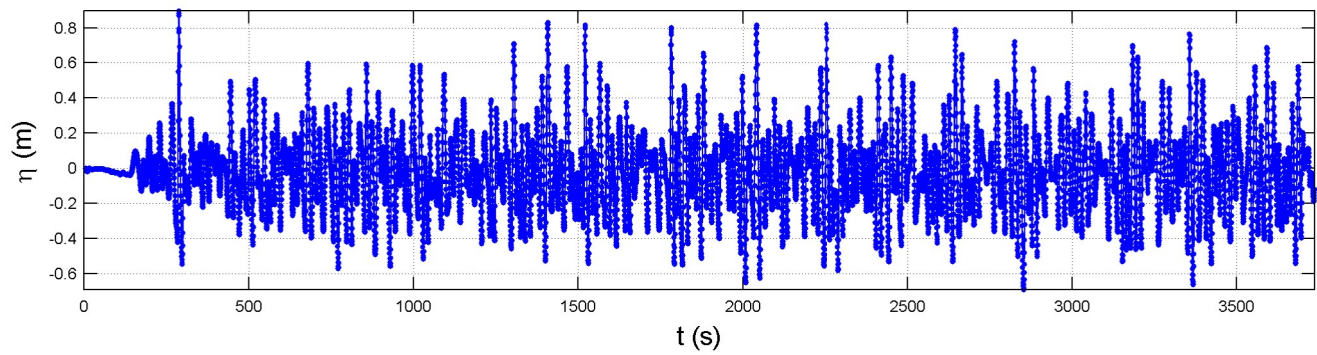
P2 Jun-2014



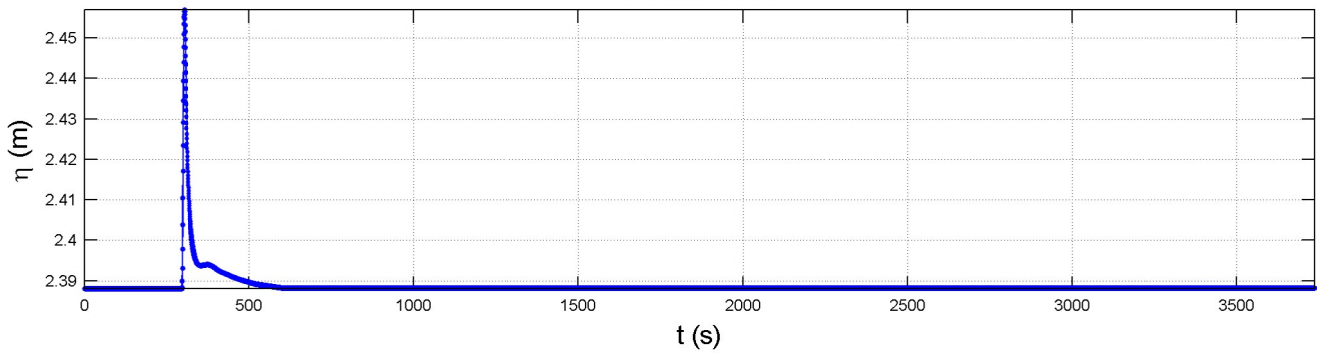
P3 Jun-2014



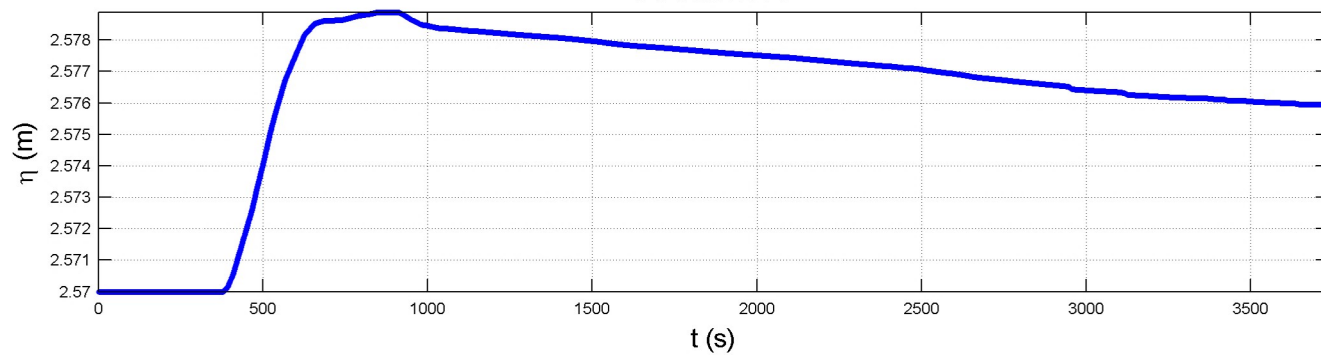
P4 Jun-2014



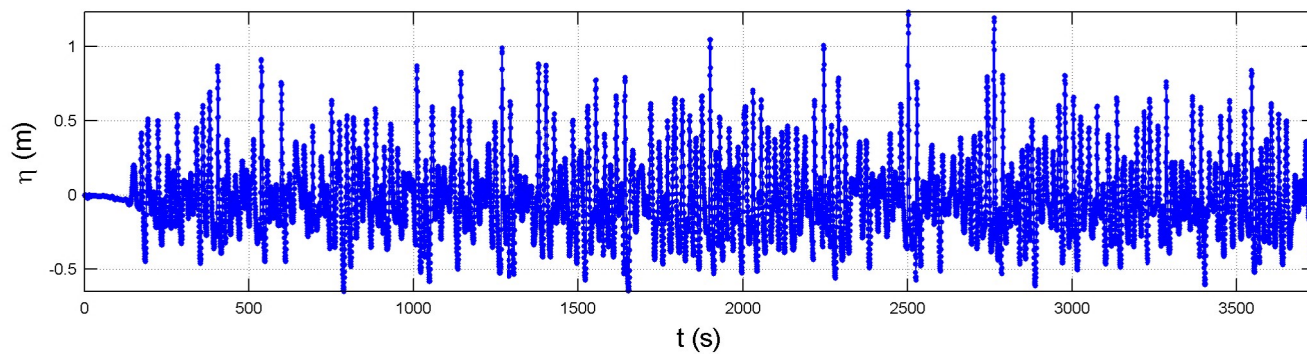
P5 Jun-2014



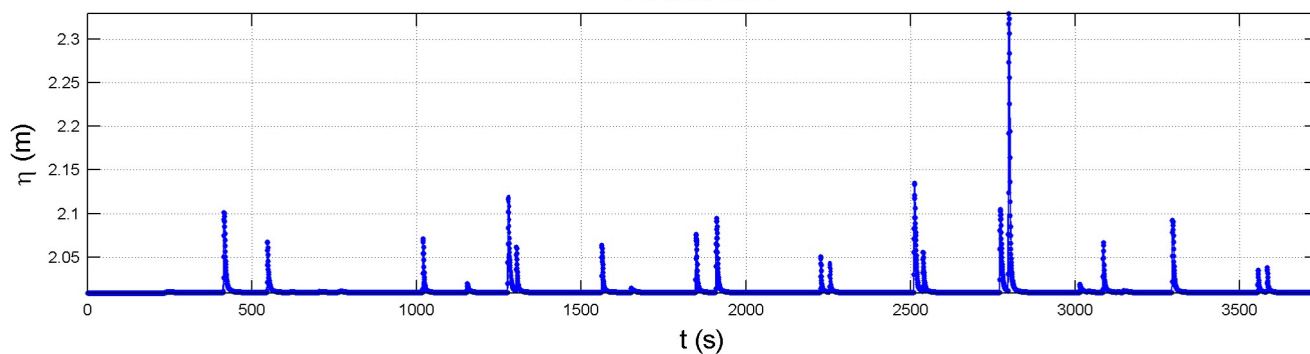
P6 Jun-2014



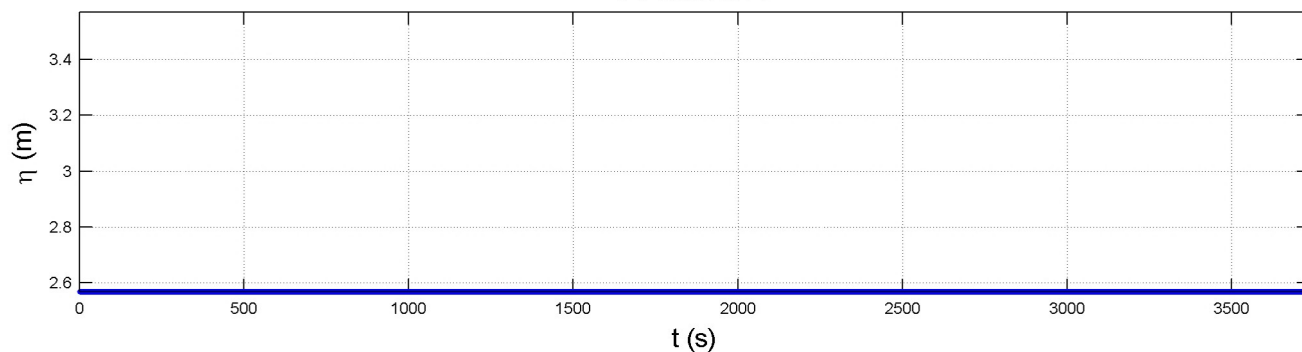
P7 Jun-2014



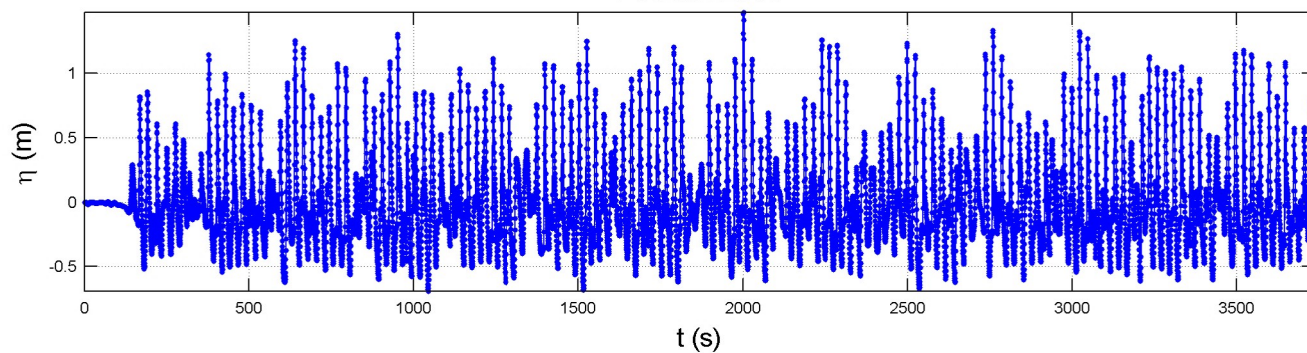
P8 Jun-2014



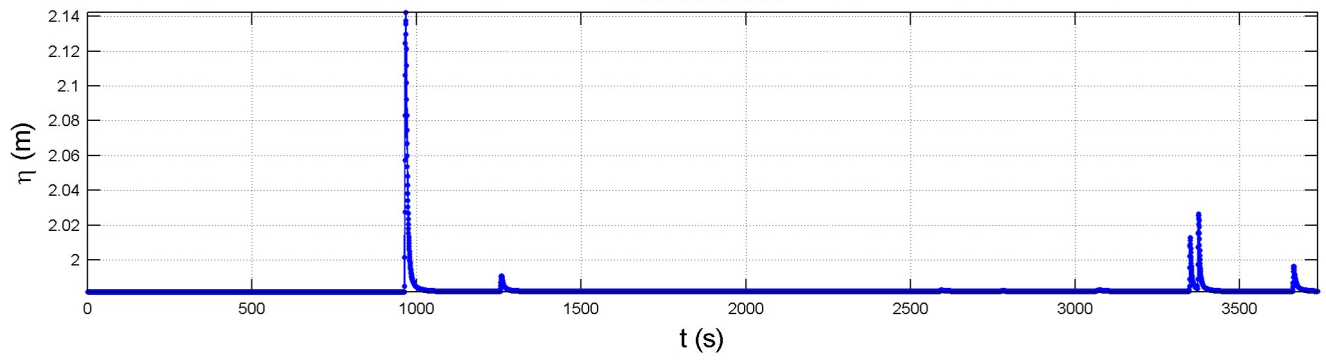
P9 Jun-2014



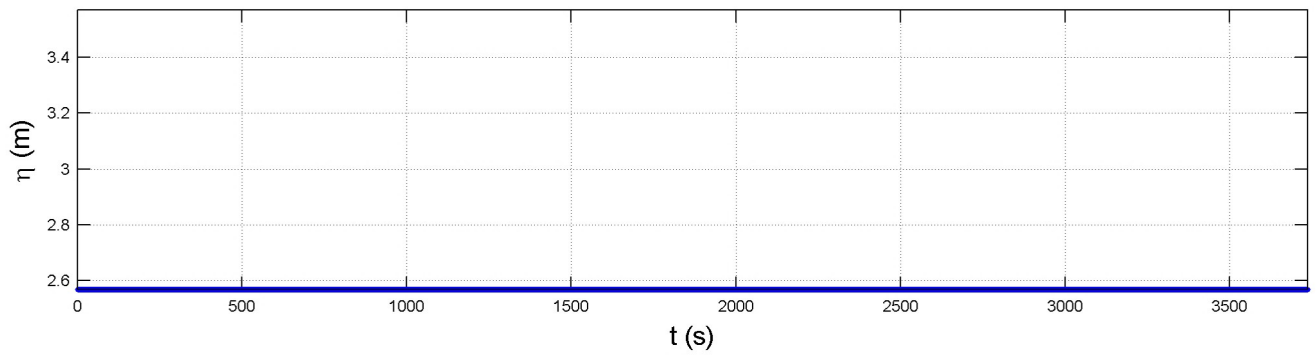
P10 Jun-2014



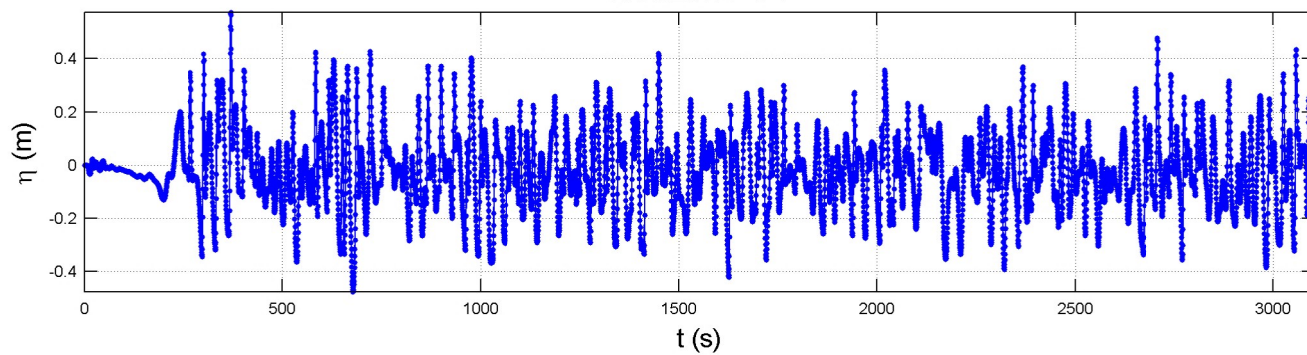
P11 Jun-2014



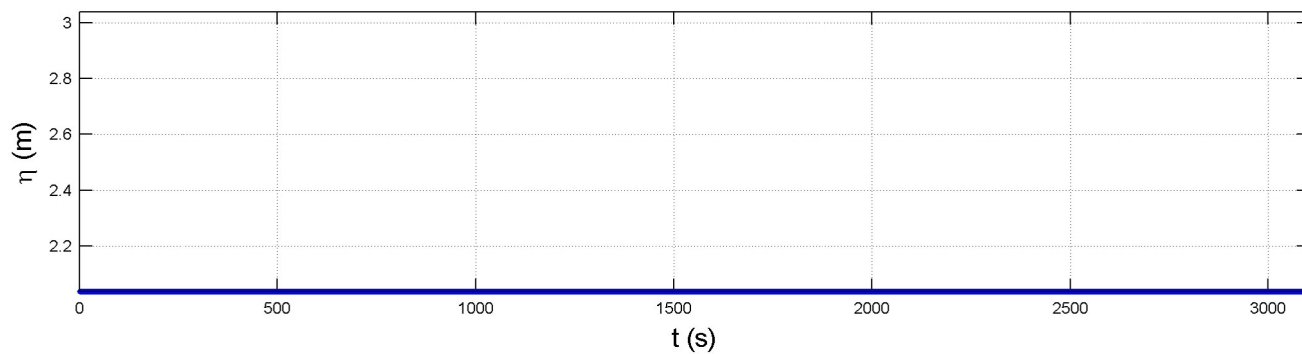
P12 Jun-2014



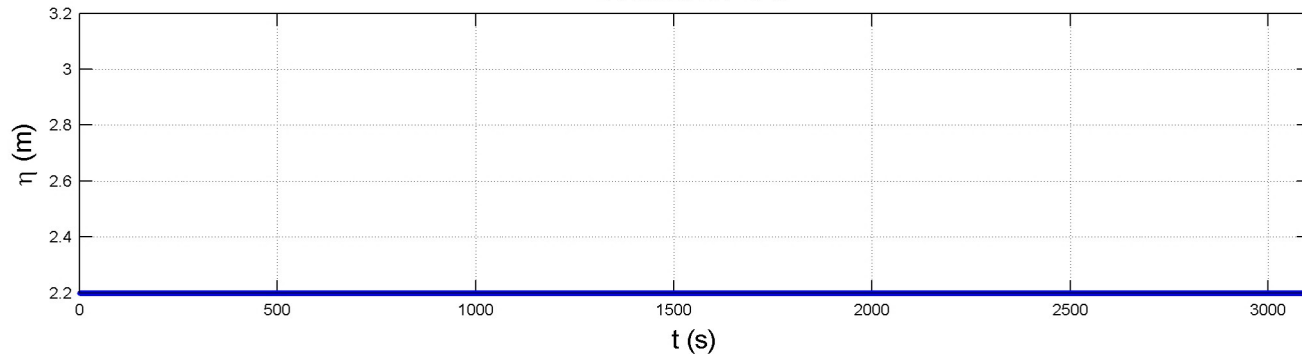
FAMILIA A - P1



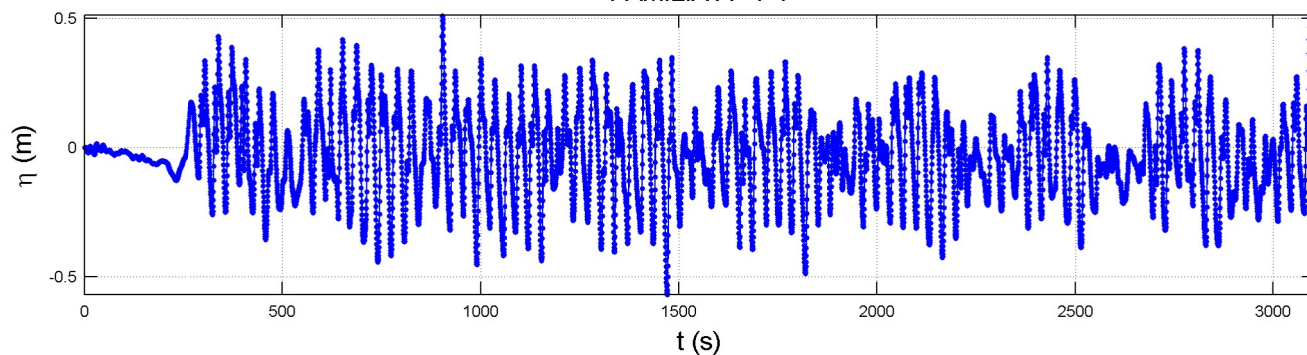
FAMILIA A - P2



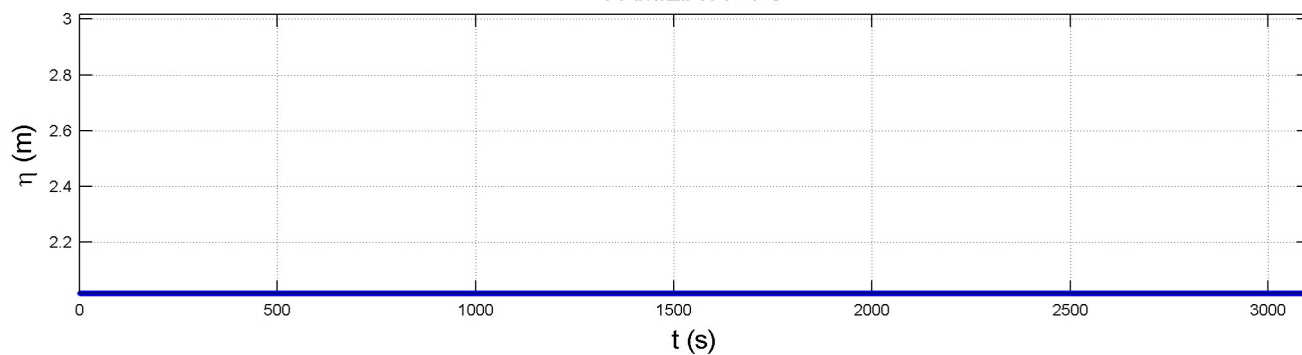
FAMILIA A - P3



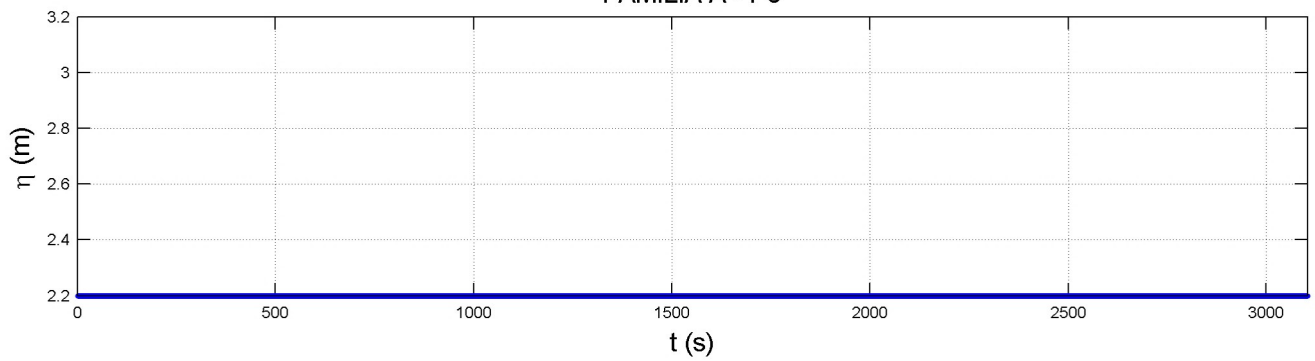
FAMILIA A - P4



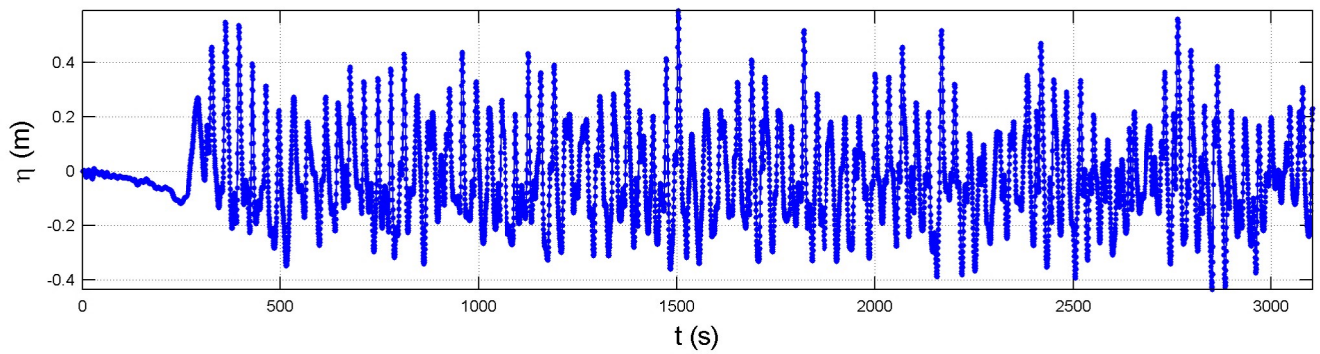
FAMILIA A - P5



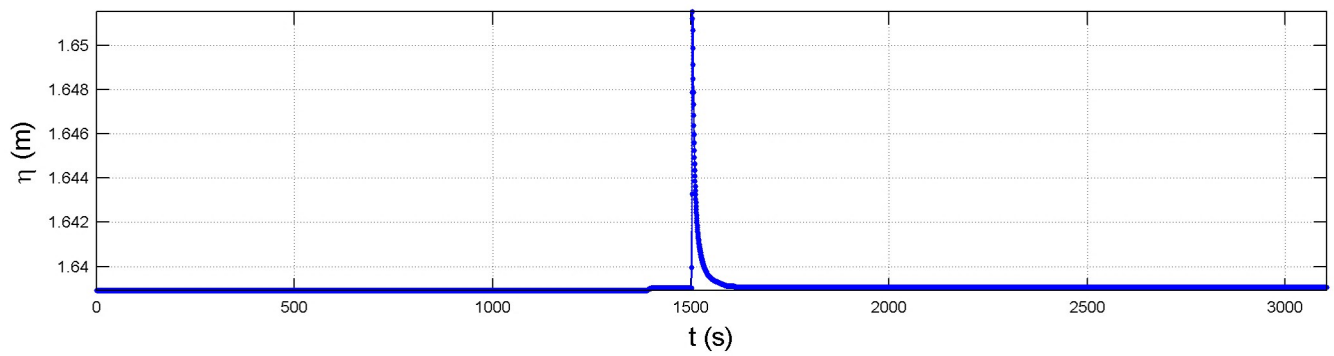
FAMILIA A - P6



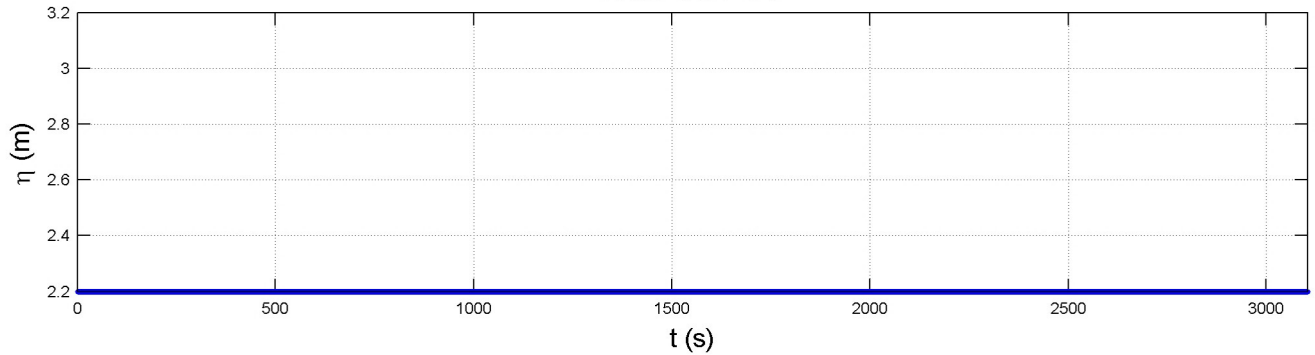
FAMILIA A - P7



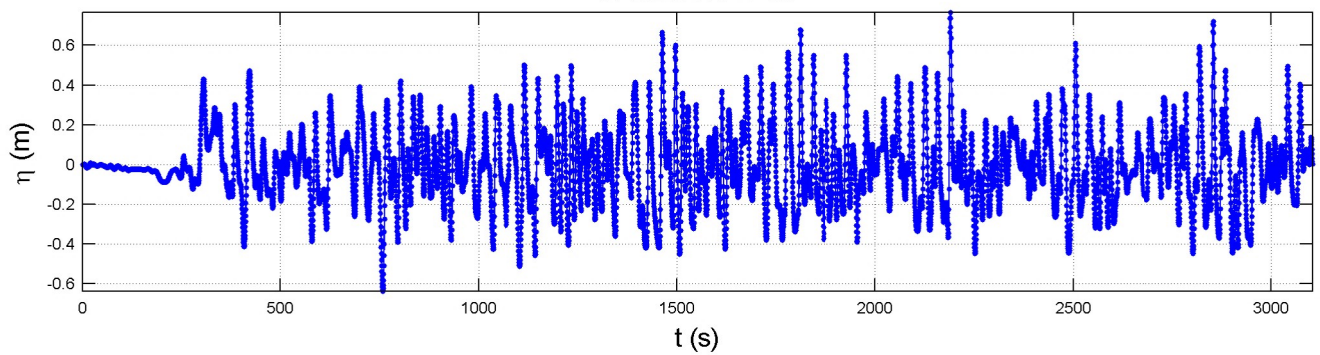
FAMILIA A - P8



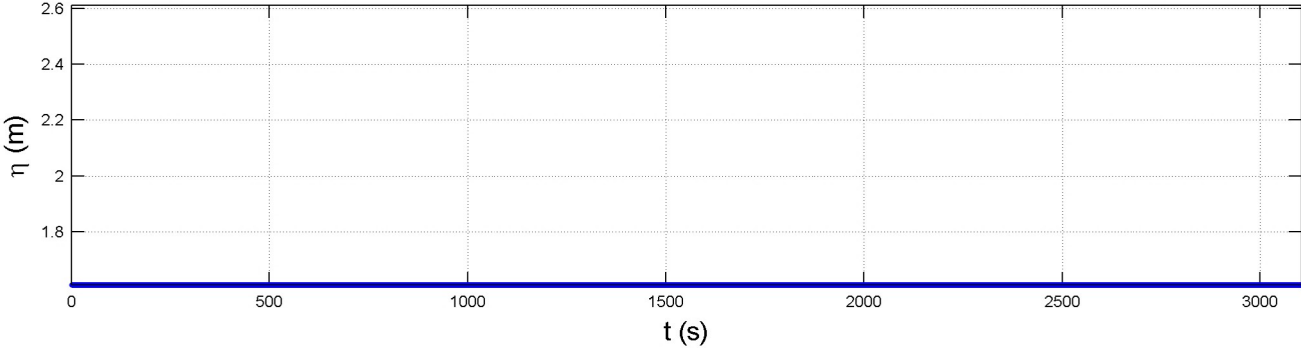
FAMILIA A - P9



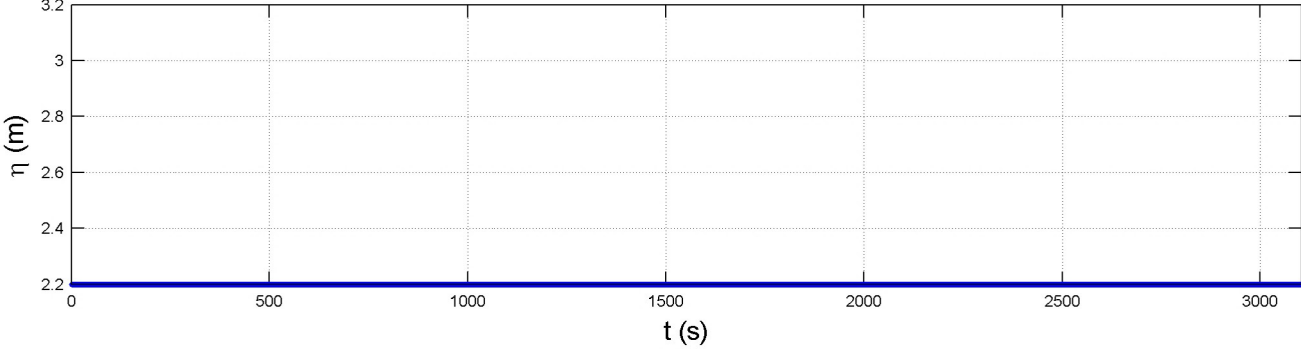
FAMILIA A - P10



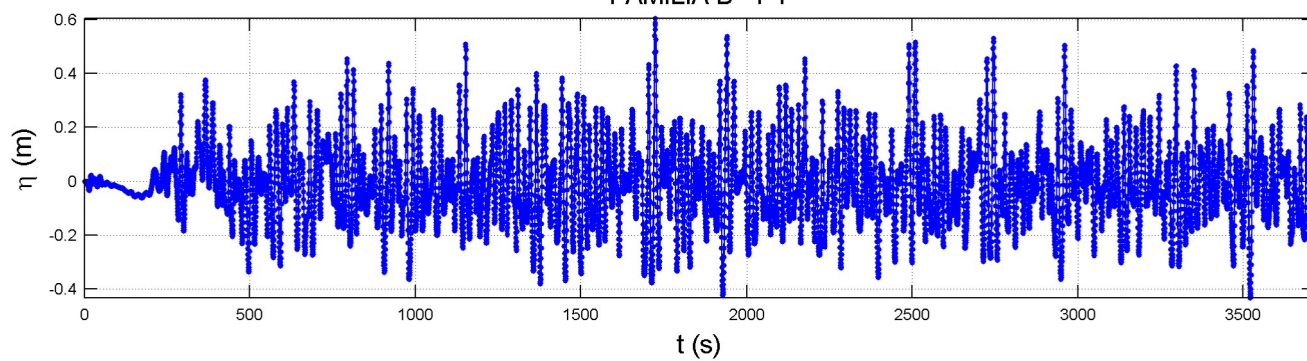
FAMILIA A - P11



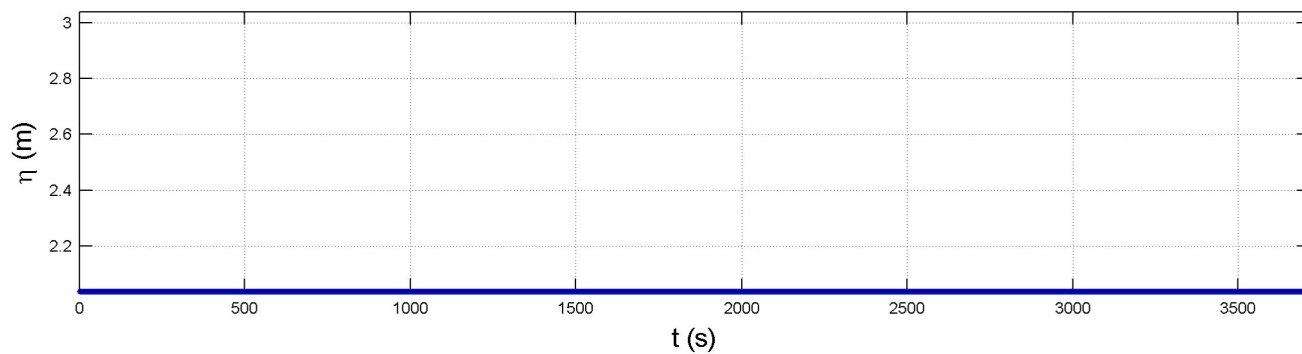
FAMILIA A - P12



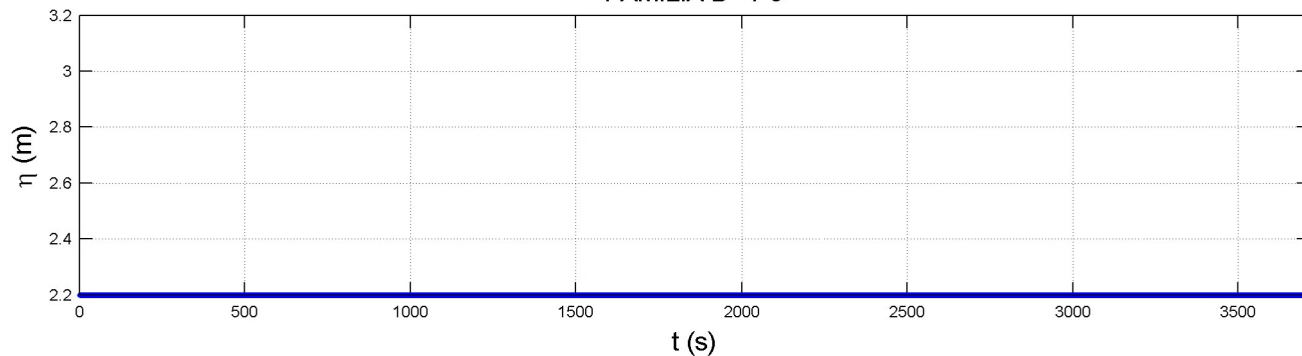
FAMILIA B - P1



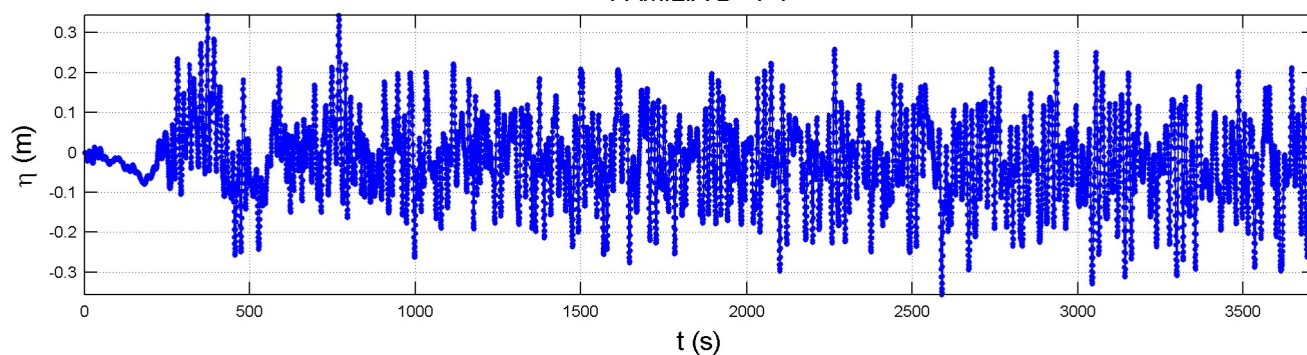
FAMILIA B - P2



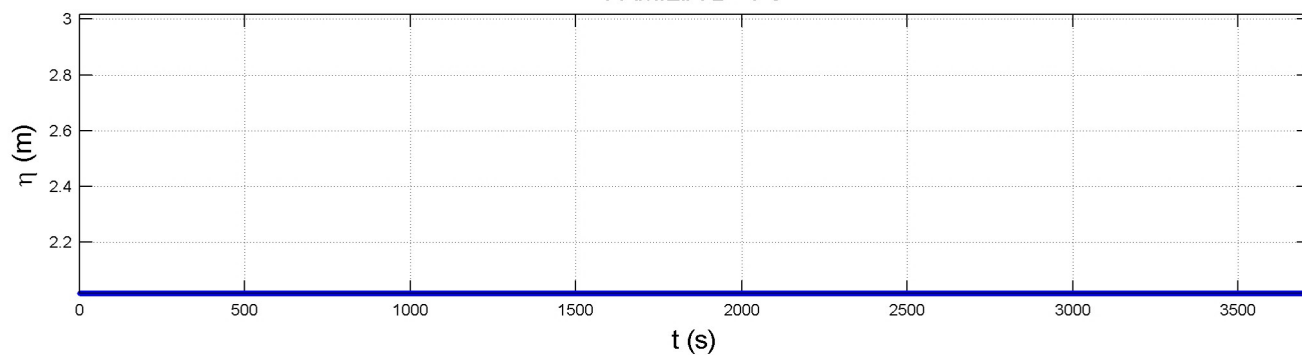
FAMILIA B - P3



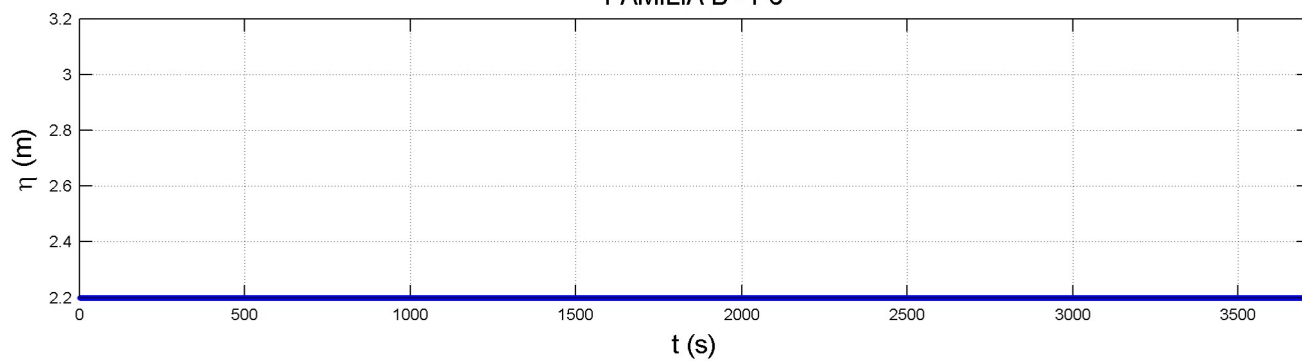
FAMILIA B - P4



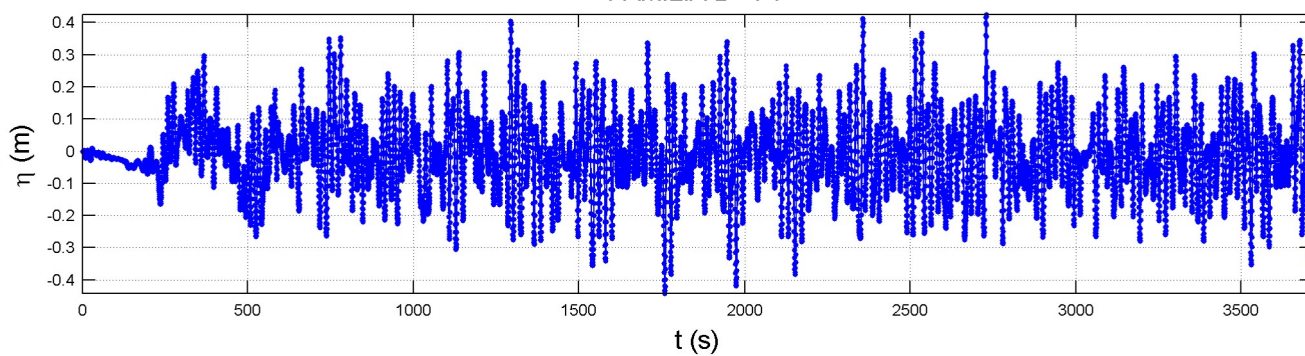
FAMILIA B - P5



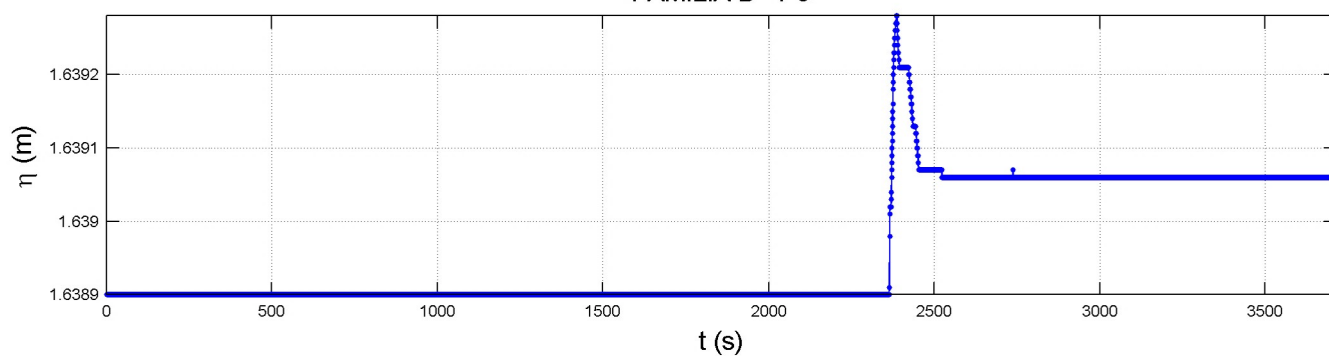
FAMILIA B - P6



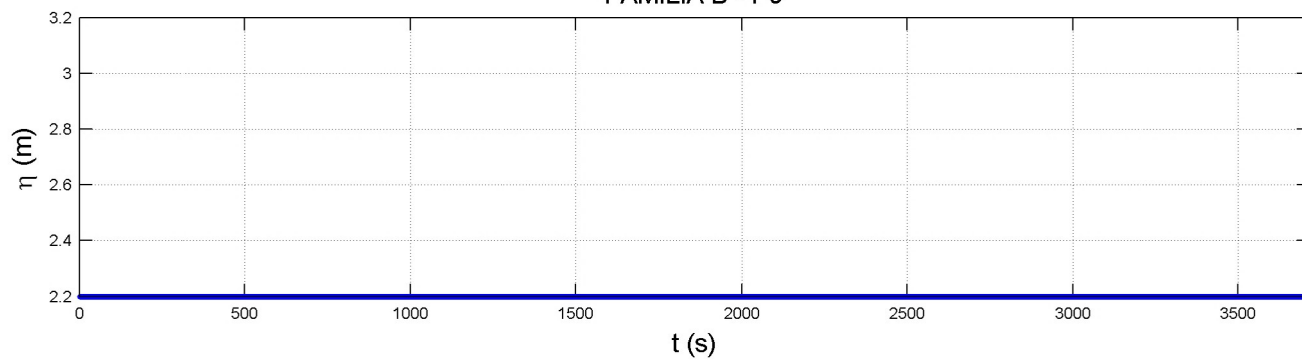
FAMILIA B - P7



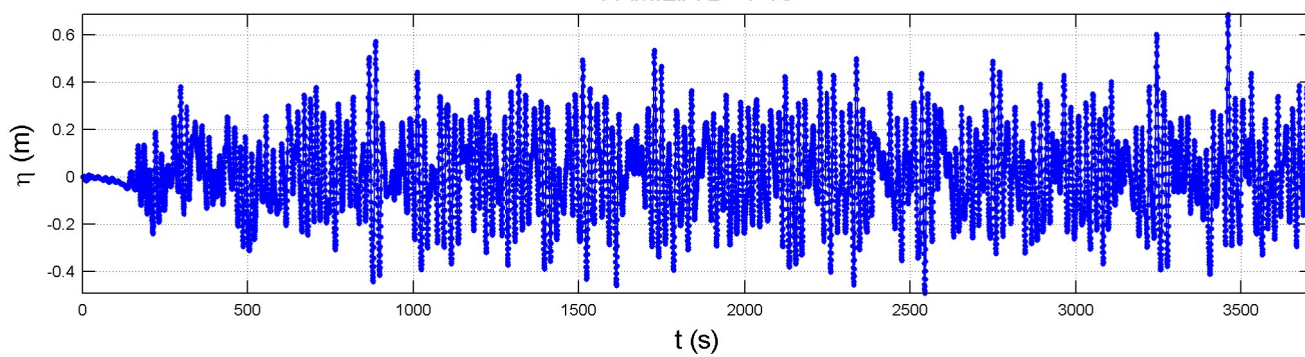
FAMILIA B - P8



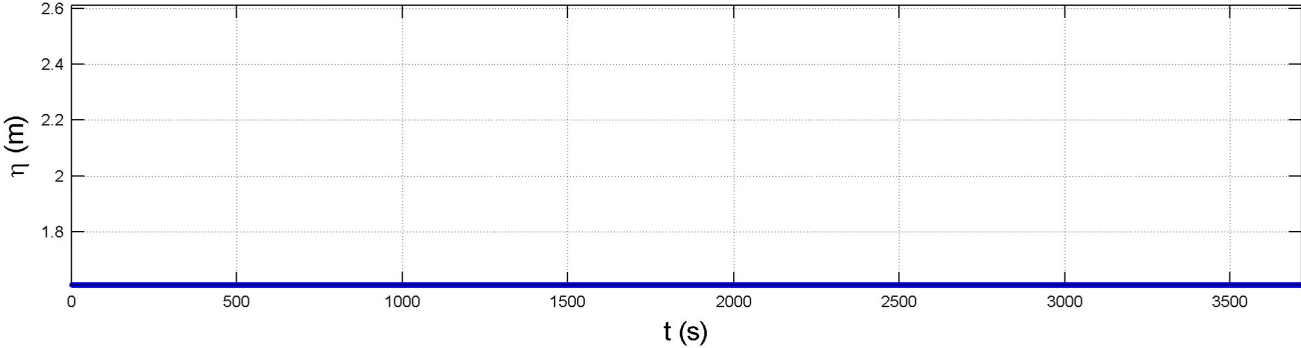
FAMILIA B - P9



FAMILIA B - P10



FAMILIA B - P11



FAMILIA B - P12

